



Escola Politècnica Superior
d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

PROJECTE FI DE CARRERA

TÍTOL: Estudio de componentes para automoción con aleaciones de Al-Si
inyectadas a presión

AUTOR: Javier Martínez Fortes

TITULACIÓ: Ingeniería Técnica Industrial, especialidad en Mecánica

DIRECTOR: Antoni Forn Alonso

DEPARTAMENT: 702, Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica

DATA: 25/06/2012

TÍTOL: Estudio de componentes para automoción con aleaciones de Al-Si
inyectadas a presión

COGNOMS: Martínez Fortes

NOM: Javier

TITULACIÓ: Ingeniería Técnica Industrial

ESPECIALITAT: Mecánica

PLA: 95

DIRECTOR: Antoni Forn Alonso

DEPARTAMENT: 702, Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica

QUALIFICACIÓ DEL PFC

TRIBUNAL

PRESIDENT

SECRETARI

VOCAL

DATA DE LECTURA:

Aquest Projecte té en compte aspectes mediambientals: ☐ Sí ☐ No

PROJECTE FI DE CARRERA

RESUM (màxim 50 línies)

Debido a la aplicación de la normativa sobre emisiones contaminantes y al ahorro económico, el sector de la automoción está en constante búsqueda de nuevos materiales, más ligeros, más económicos si es posible, y con buenas prestaciones mecánicas. Por eso, las aleaciones de aluminio son un producto industrial cada vez más extendido, pero cuyo diseño es todavía un proceso de importante evolución en los casos donde se utilizan tecnologías de conformación.

En este proyecto se estudia el interés que pueda derivarse de la fabricación de componentes de aluminio-silicio conformados en estado semisólido (Semi-Solid Metal, SSM) como alternativa a las piezas fabricadas tanto con fundiciones férricas de matriz ferrítica, como con aleaciones de aluminio-silicio inyectadas. Por ello, se estudian las ventajas e inconvenientes de los distintos procesos de fabricación, y las propiedades mecánicas resultantes en cada uno de los casos. Como ejemplo, se ha partido de un componente para automoción, inyectado a presión con la aleación L-2630.

En este trabajo también se analizan las consecuencias que tendrían estas opciones en el sector de la automoción, es decir; cómo afectaría la inclusión en los automóviles de componentes más ligeros con mejores características mecánicas, y si las soluciones propuestas serían viables económicamente en la actualidad industrial.

Paraules clau (màxim 10):

Fundición férrica	HPDC	Propiedades mecánicas	Automóviles
Acero	SSM	Micrografías	Ligereza
Aleaciones Al-Si	T6		

Índice:

1. Introducción	2
1.1. Objetivos	2
1.2. Justificación	3
2. Materiales utilizados en los automóviles	4
2.1. Evolución del peso de los vehículos	4
3. El aluminio en el sector de la automoción	6
3.1. Ventajas de la utilización de aleaciones de aluminio	6
3.2. Tipos de componentes fabricados en aluminio	13
3.3. Innovación en diseño y métodos de producción de piezas de aluminio	14
4. Aleaciones de aluminio utilizadas en fundición	18
5. Estudio de un componente de automoción inyectado a presión con la aleación L-2630	24
5.1. Descripción del componente	24
5.2. Procedimiento experimental	25
6. Resultados y discusión de resultados	37
6.1. Análisis micrográfico	37
6.1.1. Porosidad	38
6.1.2. Análisis microestructural	41
6.2. Ensayo de rotura	45
7. Ventajas de la fabricación del lateral de aluminio estudiado por técnicas de inyección en estado semisólido	55
8. Conclusiones	67
9. Perspectivas	69
10. Presupuesto	70
11. Impacto medioambiental	72
12. Agradecimientos	73
13. Índice de tablas y figuras	74
14. Bibliografía	76

1. Introducción

1.1. Objetivos

En este proyecto se estudia el interés que pueda derivarse de la fabricación de componentes de aluminio-silicio conformados en estado semisólido (Semi-Solid Metal, SSM), como alternativa a las piezas fabricadas tanto con fundiciones férricas de matriz ferrítica, como con aleaciones de aluminio-silicio inyectadas. Por ello, se estudian las ventajas e inconvenientes de los distintos procesos de fabricación, y las propiedades mecánicas resultantes en cada uno de los casos.

Como ejemplo, se ha partido de un componente para automoción, inyectado a presión con la aleación L-2630. El componente cumple con las exigencias mecánicas para las que se ha diseñado, aunque cuenta con defectos y limitaciones. Se trata de un lateral de aluminio del asiento de un vehículo de transporte público.

Sin embargo, esta pieza podría rediseñarse utilizando aleaciones de primera fusión y técnicas en SSM que permitirían reducir su peso y mantener o mejorar las propiedades mecánicas como el límite elástico, y al mismo tiempo se aumentaría sustancialmente su porcentaje de alargamiento ante rotura.

En este trabajo también se analizan las consecuencias que tendrían estas opciones en el sector de la automoción, es decir; cómo afectaría la inclusión en los automóviles de componentes más ligeros con mejores características mecánicas, y si las soluciones propuestas serían viables económicamente en la actualidad industrial.

1.2. Justificación

Este proyecto fue propuesto por el Departamento de Ciencia de los Materiales y Ingeniería Metalúrgica de la Escuela Politécnica Superior de Ingeniería de Vilanova y la Geltrú (EPSEVG), y realizado en el Centro de Diseño de Aleaciones Ligeras y Tratamientos de Superficie (CDAL) perteneciente a la Universidad Politécnica de Cataluña en el campus de la EPSEVG.

Debido a la aplicación de la normativa sobre emisiones contaminantes y al ahorro económico, el sector de la automoción está en constante búsqueda de nuevos materiales, más ligeros, más económicos si es posible, y con buenas prestaciones mecánicas. Por eso, las aleaciones de aluminio son un producto industrial cada vez más extendido, pero cuyo diseño es todavía un proceso de importante evolución en los casos donde se utilizan nuevas tecnologías de conformación.

Otra de las razones por las que se eligió este tema fue por la posibilidad de trabajar en el CDAL, que tiene como objetivos contribuir al desarrollo industrial facilitando la innovación y la incorporación de nuevas tecnologías como estrategia de competitividad, y por ello han ido adquiriendo una importante experiencia que se ha visto reflejada en este trabajo. Además, se han podido utilizar sus instalaciones junto con las de la propia EPSEVG, y con la disponibilidad de todo el material científico requerido para tal proyecto, y el asesoramiento y ayuda de los distintos profesionales presentes. Si algo define la forma de realizar este trabajo ha sido la gran flexibilidad en los métodos de trabajo.

2. Materiales utilizados en los automóviles

En la Fig. 1 puede observarse la composición media aproximada de un vehículo. Los primeros automóviles estaban contruidos a imagen y semejanza de los carruajes de caballos, con una alta composición de madera. A mediados del siglo XX proliferaban los aceros en carbono y las fundiciones férricas en los coches y no ha sido hasta finales del siglo XX cuando ha empezado a reducirse la inclusión de estos materiales. Los aceros de alta resistencia y de alta aleación, así como el aluminio, principalmente en forma de aleaciones con magnesio y silicio o bien aleaciones con magnesio y manganeso; han ido sustituyendo progresivamente al acero bajo en carbono y a las fundiciones férricas respectivamente, en las estructuras de los vehículos, [1-2].

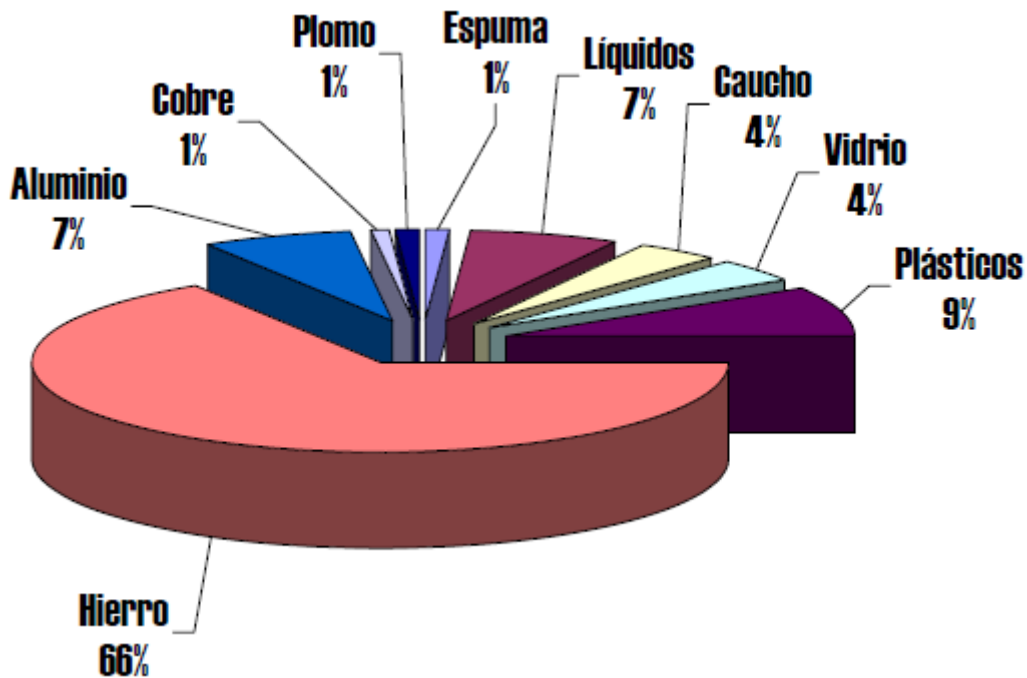


Fig. 1. Composición media en peso de un automóvil, [1].

2.1. Evolución del peso de los vehículos

A pesar del impacto negativo sobre el consumo de combustible y otros aspectos, el peso medio de los automóviles ha experimentado una tendencia drástica al aumento en los últimos años; efecto conocido como la “espiral del peso”, como se ilustra en la Fig. 2.

El aumento de peso se debe a la incorporación de múltiples sistemas de seguridad, distintos elementos multimedia, hacer más confortable el coche,... entre muchos otros. Se quieren hacer coches mejores en todos los sentidos, y eso implica incorporar más componentes que provocan un incremento de peso del vehículo en general. Por eso se necesitan motores más potentes y eficientes, frenos más grandes, suspensiones más rígidas,... para poder garantizar las prestaciones deseadas en el automóvil antes de su aumento de peso, y al rediseñar estos elementos se está aumentando nuevamente el peso total del coche.

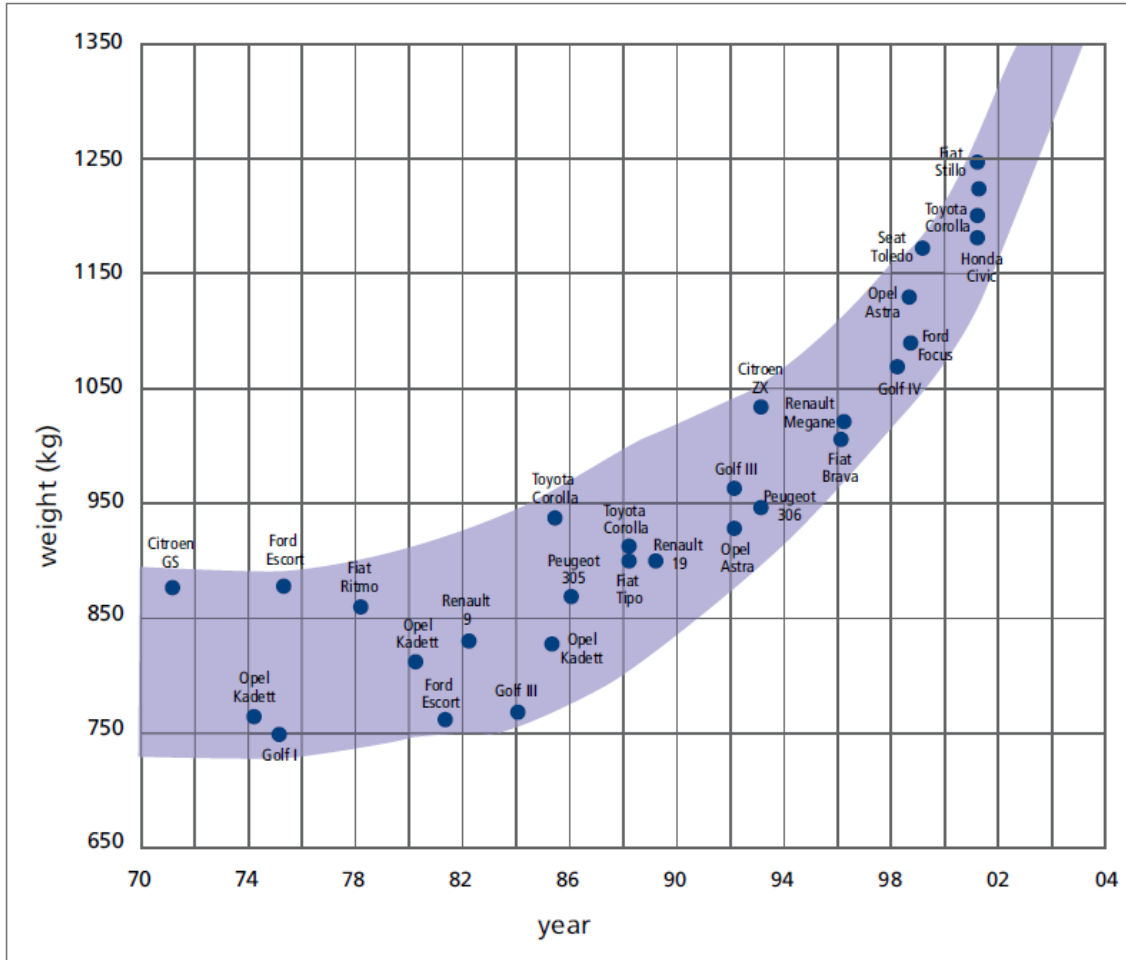


Fig. 2. Evolución del peso en los vehículos de turismo del segmento de los compactos (C), [3].

Paralelamente al aumento de peso de los automóviles, el precio de los combustibles fósiles derivados del petróleo ha experimentado también un incremento constante y creciente en las últimas décadas, aumentando los costes asociados al consumo de combustible y consecuentemente sobre el transporte, así como sobre el índice de precios al consumo (IPC).

Presente y futuro pasan por invertir la tendencia del aumento de peso en los coches, [3].

3. El aluminio en el sector de la automoción

3.1. Ventajas de la utilización de aleaciones de aluminio

El aluminio ha sido un material muy estudiado para su aplicación en el campo de la automoción desde hace muchas décadas, debido principalmente a su ligereza. Ya en los años 1940 y 1950 había carrocerías fabricadas enteramente en aluminio; sin embargo, su elevado precio, y sus desventajas, en cuanto a su proceso de fabricación con respecto al del acero, lo limitaban a vehículos de competición o de muy alta gama, [2].

El aluminio es el tercer elemento más abundante en la corteza terrestre, aunque su facilidad para reaccionar con otros elementos hace que su forma pura en estado metálico sea bastante escasa, y que generalmente se encuentra en forma de silicatos. Como material presenta una densidad bastante baja (aproximadamente, un tercio de la del acero), una altísima resistencia a la corrosión (más o menos, del orden de tres o cuatro veces superior a la del acero), y una gran maleabilidad; propiedades muy deseables para su utilización en el sector de automoción. Como principales desventajas destacar su relativa fragilidad (comparada con el acero), así como su elevado coste resultado del costoso proceso de extracción por electrólisis que hace que los precios del aluminio sean elevados. Además, sus excelentes propiedades mecánicas dependen del mantenimiento del grado de pureza durante el procesado, [1-2].

Actualmente la implantación del aluminio en los vehículos ya está muy extendida, y estos incorporan piezas de aluminio generalmente en lugares no críticos a la hora de absorber energía de impacto, ya que las propiedades del aluminio no son las más apropiadas para ello; en cambio el acero es mucho más adecuado para esas situaciones. Sin embargo, existen vehículos con elementos estructurales completamente de aluminio, aunque no son vehículos particularmente económicos.

Uno de los aspectos más importantes a tener en cuenta sobre los vehículos con elementos estructurales completamente realizados en aluminio, es que salvo excepciones la unión entre las piezas no se realiza mediante procesos de soldadura. La soldadura reduce la resistencia mecánica del aluminio aproximadamente en un 50 %, y puede causar potenciales problemas puntuales allí donde se realice, por lo que hay que buscar nuevos métodos tales como el uso de adhesivos o uniones por tornillos, [2].

Una de las muchas ventajas que ofrece la utilización de aleaciones de aluminio inyectadas como sustitutas de la fundición férrea, sería la de reducir el peso de los componentes fabricados por este material, y por tanto el peso global del coche. Las piezas fabricadas por fundición férrea son más pesadas que las de acero y mucho más que las del aluminio por su superior densidad. En el campo de la automoción la reducción del peso es un aspecto fundamental que conlleva la consiguiente reducción del consumo de combustible y emisiones de CO₂ (junto con otros gases contaminantes) a la atmósfera.

En 2005 se instalaron dos millones de toneladas de componentes de aluminio en las carreteras europeas gracias a su utilización en los vehículos. El ahorro de peso logrado por utilizar aluminio en los automóviles ha servido para conseguir un ahorro anual aproximado cifrado en 1.000 millones de litros de combustible y una reducción de las emisiones de CO₂ por valor de 40 millones de toneladas, durante la vida útil de esos coches.

Un estudio realizado por Knibb, Gormezano & Partners (KGP) en cooperación con la Asociación Europea del Aluminio (EAA) incluye los datos de las compañías y proveedores del mundo de la automoción. El estudio se basa en el análisis de los 15 millones de automóviles producidos en Europa en 2005, además de la investigación de 20 componentes de la carrocería, 17 componentes del chasis y suspensión y 25 componentes mecánicos. El estudio se centra en los materiales de aluminio y sus procesos (fundiciones, extrusiones, forjados y planchas). En la carrocería del automóvil la mayor cantidad de componentes realizados en aluminio son los sistemas de aire acondicionado, capó, travesaños de los parachoques y columnas de la dirección, con una media de 26 kg de aluminio por coche. Las partes de aluminio de la sección del chasis y de la suspensión de los automóviles son principalmente las llantas, brazos de la suspensión y componentes de la dirección, con una media de 37 kg de aluminio por automóvil. La culata de cilindros, los bloques de cilindros, las tapas de los motores, las bombas y los radiadores representan la mayoría de los componentes de aluminio del sistema mecánico de los automóviles producidos en el 2005, con una media de 69 kg por vehículo. El promedio total de aluminio utilizado en los coches analizados es de 132 kg. Para el presente y el futuro la cada vez mayor cantidad de aluminio en los vehículos se utilizará sobre todo en los cierres, estructura de la carrocería y aplicaciones en el chasis, mejorando a su vez la seguridad y el rendimiento.

Europa está liderando el camino de la utilización innovadora del aluminio en los automóviles. Cada 100 kilos de aluminio empleado en un automóvil sirve para reducir las emisiones de CO₂ por kilómetro en unos 9 gramos, por lo que el aluminio se ha convertido en un material clave para reducir el peso de los vehículos. Gracias a la introducción continuada de las nuevas tecnologías que proporcionan ventajas superiores en lo que respecta al diseño y procesos de fabricación, la tendencia a aumentar la integración del aluminio en los automóviles continuará. El aluminio desarrollará un papel importante en las generaciones futuras de vehículos sostenibles.

Los cálculos se basan en las siguientes suposiciones:

- Vida útil del automóvil: 200.000 km.
- Kilómetros recorridos al año por un automóvil: 15.000 km.
- Ahorro de 0,35 l de combustible por cada 100 km, en cada reducción de peso de 100 kg.
- 2,455 kg de CO₂ por cada litro de combustible, como valor medio para los motores gasolina y diesel, [3].

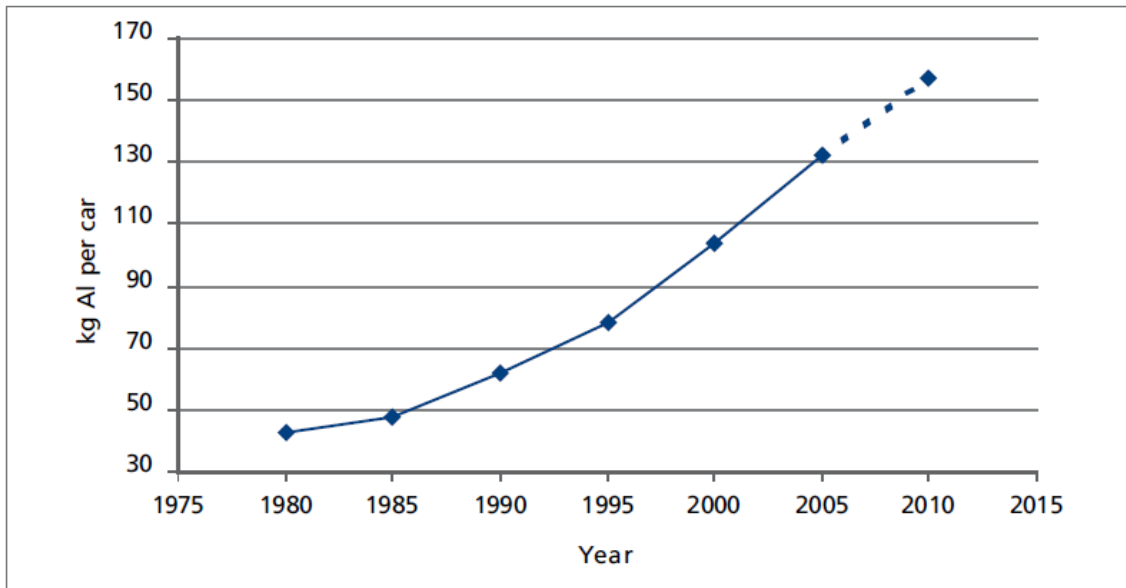


Fig. 3. Evolución del contenido de aluminio en los automóviles producidos en Europa, [3].

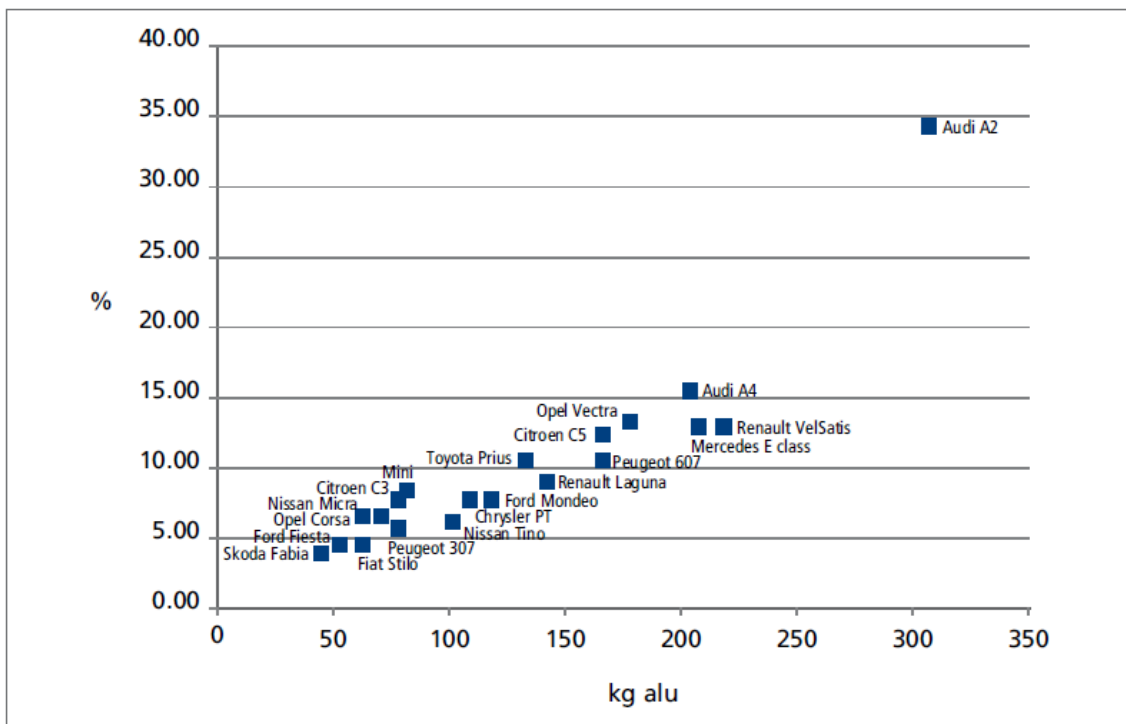


Fig. 4. Contenido de aluminio en algunos coches producidos en Europa en el año 2005, [3].

En la Fig. 4 se puede ver una diferencia considerable entre el Audi A2 y el resto de los vehículos mostrados, efecto debido a que el Audi A2 hizo un uso intensivo de aluminio y eso le permitió un ahorro directo del peso de 134 kg. El Audi A2 tenía un peso total aproximado de tan sólo 895 kg que lo convertían en un referente en su sector, y en una apuesta innovadora y arriesgada en el sector automotriz. No fue un éxito de ventas ya que el uso de cantidades altas de aluminio hizo que tuviera un precio superior respecto a la competencia, cosa que no todo el

mundo estaba dispuesta a pagar, pero aun así fue un pionero tecnológico. Solo se fabricó durante el periodo 1999-2005, [3-4].

Un ejemplo más actual y viable de los beneficios que propicia el aluminio en un vehículo sería el siguiente ejemplo:

Audi A6

La última generación del Audi A6 (cuarta generación: 2011-actualidad) usa una construcción híbrida de aluminio y acero. A diferencia de otros vehículos de su clase, el nuevo Audi A6 utiliza una tecnología innovadora de construcción ligera que hasta ahora se había introducido principalmente en coches deportivos. Sus ventajas son un menor consumo, unas inferiores emisiones de CO₂ (y demás gases contaminantes) y un mejor y más dinámico comportamiento del automóvil. La estructura híbrida de aluminio y acero de Audi pesa alrededor de un 15 % menos que una carrocería similarmente comparable fabricada completamente en acero.

Más del 20 % de la carrocería y del chasis del Audi A6 se fabrica en aluminio (como se muestra en la Fig. 5, y también en la Fig. 6), un material con el que Audi ha acumulado una gran experiencia desde que el Audi A8 saliera al mercado en 1994, [4].

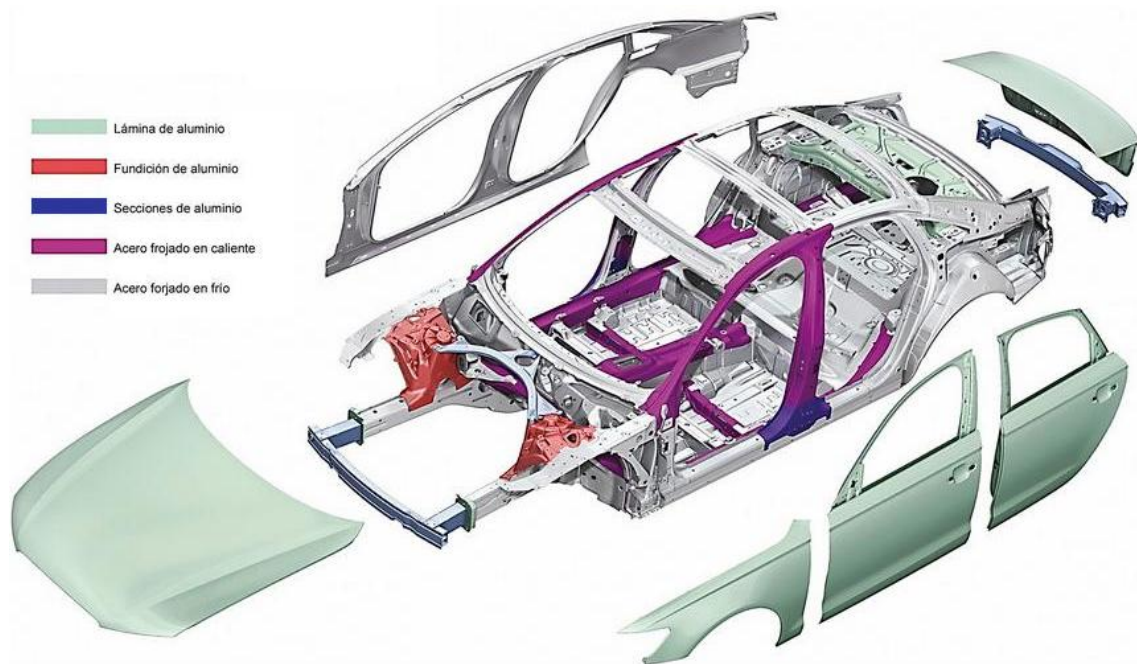


Fig. 5. Materiales empleados en la carrocería y el chasis del Audi A6, [4].

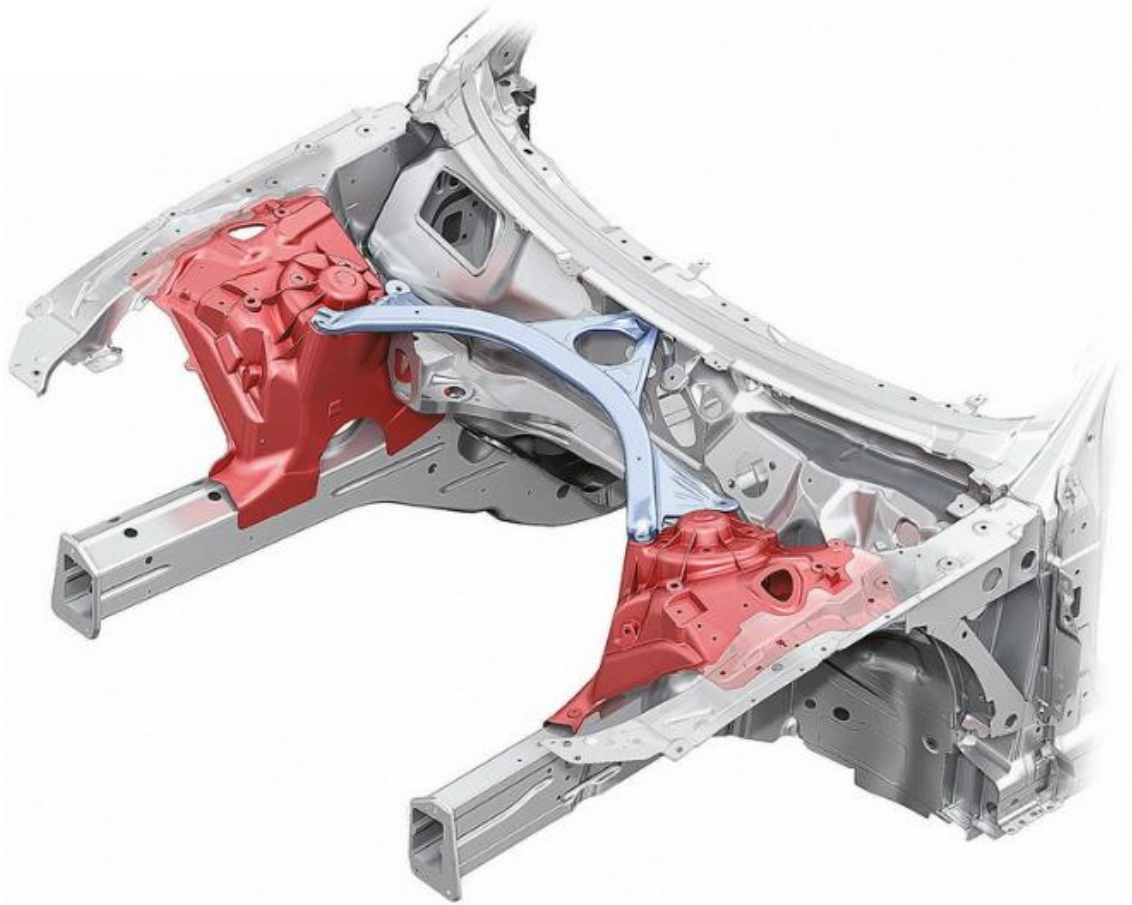


Fig. 6. Montajes del soporte de la suspensión en aluminio fundido y puente de los soportes de la suspensión en aluminio en el Audi A6, [4].

Como se ve en la Fig. 5 y en la Fig. 6 no hay rastro de fundición férrea en la carrocería y el chasis del nuevo Audi A6. La fundición de aluminio está haciendo desaparecer a la ferrosa debido a su inferior peso, ya que actualmente los fabricantes de automóviles están intentando aligerar sus coches, y utilizar materiales con características parecidas o mejores y más ligeros es una buena estrategia, siempre que sea a un precio competitivo.

En función de la versión el Audi A6 puede llegar a pesar hasta 80 kilogramos menos que el modelo anterior. El modelo básico de la serie, el Audi A6 2.8 FSI de 204 cv pesa sólo 1.610 kilogramos, y eso es menos que algunos de sus rivales directos en el segmento, ya que con motorizaciones lo más parecidas posibles el BMW 520i (2010-presente) de 184 cv pesa 1670 kg y el Mercedes-Benz E 250 BlueEFFICIENCY (2009-presente) de 204 cv pesa 1650 kg, [4-6].

Volviendo a términos generales sobre las aleaciones de aluminio inyectadas como alternativa a la fundición férrea, a nivel de sostenibilidad el aluminio cuenta con una gran facilidad para el reciclaje.

En la obtención del aluminio de segunda fusión (elaborado mediante chatarra) se consigue ahorrar un 95% de energía respecto a la necesaria en la extracción del aluminio primario (es el

que se obtiene directamente de la Bauxita). La Universidad Técnica de Aquisgrán (RWTH Aachen University, Alemania) ha analizado recientemente el proceso de reciclaje del aluminio y ha concluido que el 95% del aluminio contenido en los vehículos que están en el final de su vida útil puede ser recuperado mediante tratamientos mecánicos en trituradoras modernas, a través de plantas de recuperación de metales no ferrosos.

El ciclo de vida de un vehículo se resume en la Fig. 7, y el proceso de reciclaje del aluminio se muestra en la Fig. 8. El reciclaje del aluminio en los vehículos que están en el final de su vida útil es un negocio establecido y rentable, ya que los ingresos del aluminio reciclado es el factor más importante en la economía del reciclaje de los automóviles, [1].

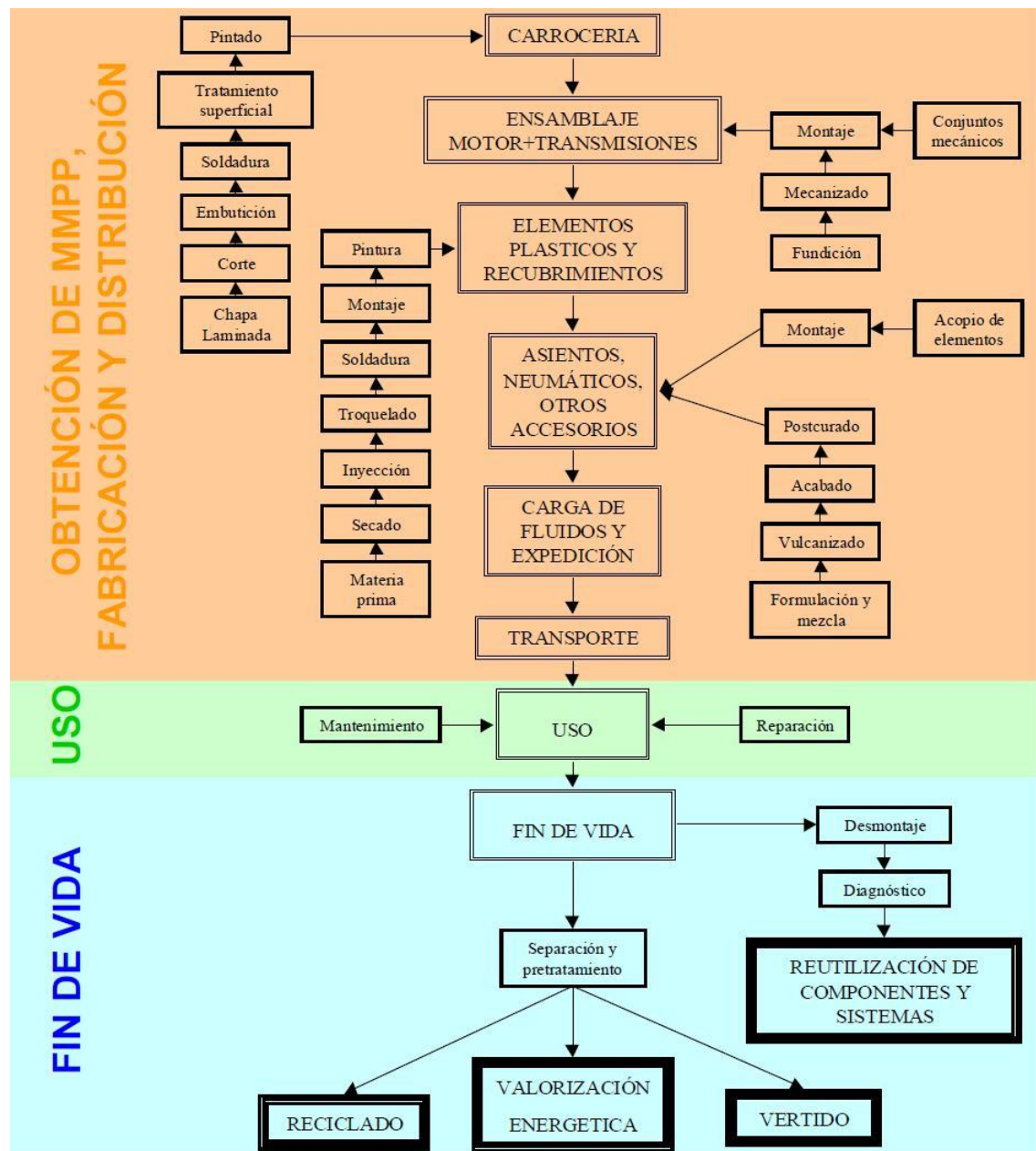


Fig. 7. Esquema general del ciclo de vida de un vehículo, [1].

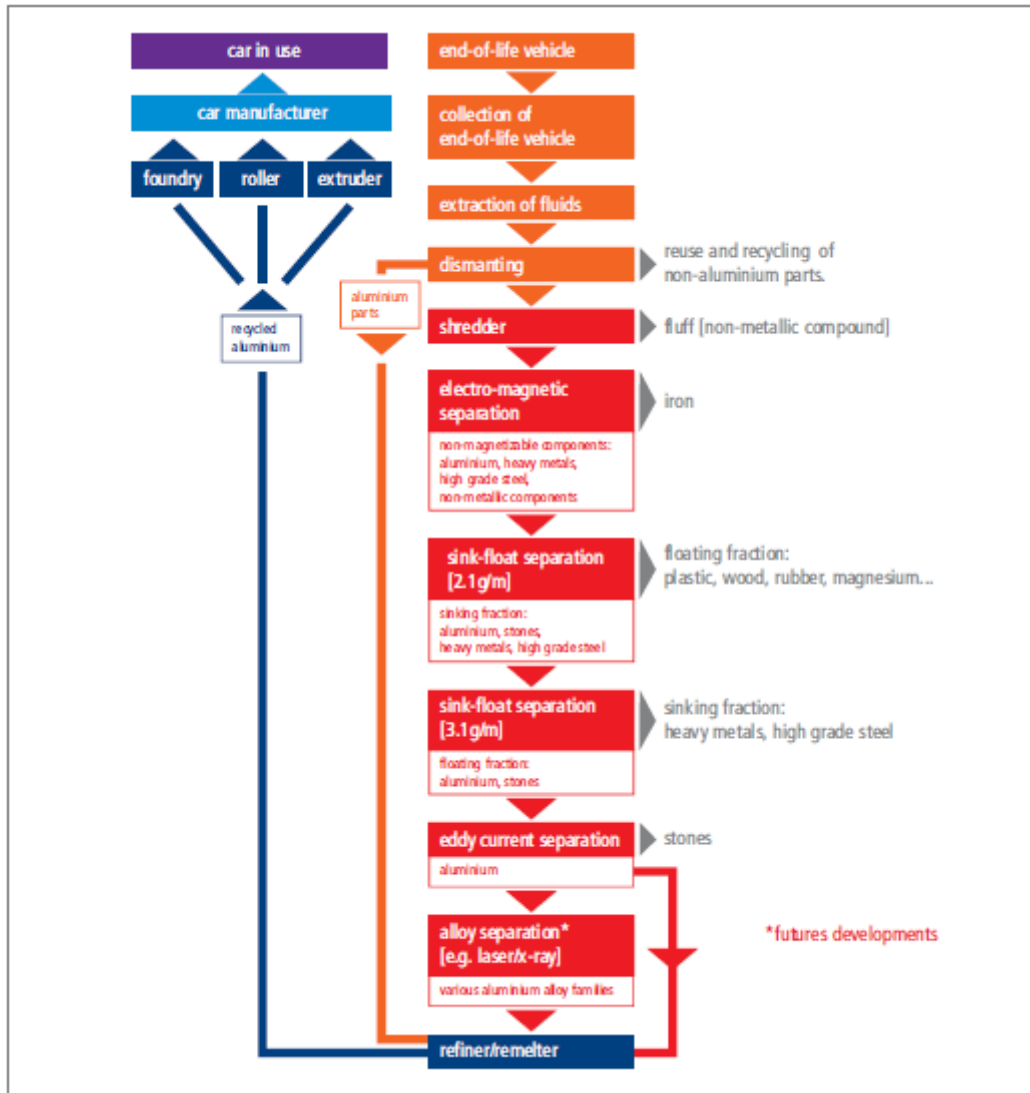


Fig. 8. Desmantelació de cotxes en el final de la seva vida útil i procés de reciclatge de l'alumini, [3].

Las provisiones del aluminio seguirán para satisfacer a la demanda, debido a que:

- Las reservas mundiales de bauxita que se utilizan para producir el aluminio primario permanecerán estables durante muchas generaciones.
- La cantidad de aluminio disponible para su reciclado está aumentando constantemente.
- La capacidad de producción de aluminio (primario, reciclaje, fundición, extrusión y laminación, entre otras) es lo suficientemente elevada, y está lo suficientemente preparada, para satisfacer la creciente demanda de la industria automotriz, [3].

3.2. Tipos de componentes fabricados en aluminio

Actualmente muchos de los componentes de un automóvil ya se fabrican con aleaciones de aluminio (Fig. 9), sobretodo para reducir el peso del vehículo.

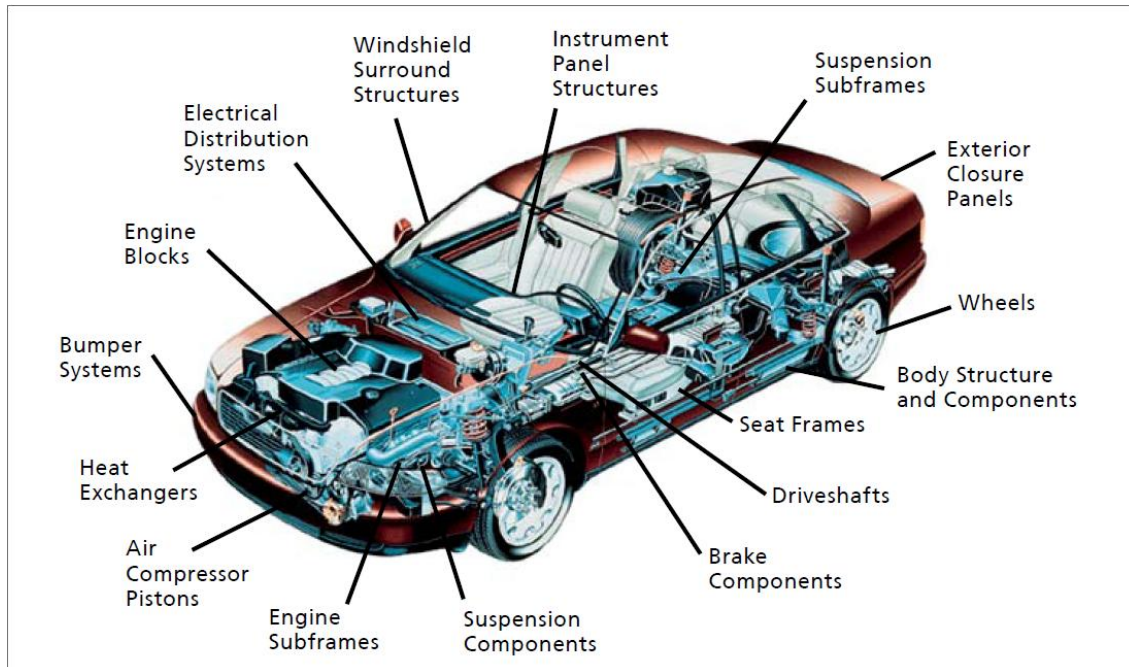


Fig. 9. Componentes que ya se fabrican en aluminio para el sector de la automoción, [3].

De todas esas partes de un coche fabricadas en aluminio interesa para este proyecto la estructura de los asientos de autocar, como ya se verá en apartados posteriores de este trabajo.

De cara al futuro los fabricantes de asientos se enfrentan a un dilema, ya que la evolución de los requisitos legislativos y sociales les orienta a caminos opuestos. Por un lado la creciente exigencia de la normativa medioambiental fuerza a que los fabricantes de vehículos dediquen grandes esfuerzos a aligerar los vehículos, ya que les permite instalar motores más pequeños y lógicamente estas exigencias se transmiten a los fabricantes de componentes como los asientos, pero al mismo tiempo los asientos cada vez incorporan más sistemas que añaden peso a los mismos, sistemas que son socialmente demandados tales como airbags y ajustes eléctricos de los asientos, y al mismo tiempo tienen que seguir cumpliendo los requisitos legislativos respecto a la resistencia de las butacas.

Por lo tanto los fabricantes de asientos se encuentran con que, por un lado se les exige fabricar asientos más ligeros y que, por otro lado se les exige seguir instalando sistemas que añaden necesariamente peso al vehículo.

A nivel de la estructura o armazón del asiento existen desarrollos por parte de algunos fabricantes para sustituir la estructura de acero del asiento, que lógicamente es relativamente

pesada; por una estructura más ligera. El aluminio es un material susceptible para sustituir al acero en las estructuras de los asientos. En cualquier caso la estructura de aluminio debe ser lo suficientemente resistente para cumplir los ensayos de homologación respecto a la resistencia de los asientos, por lo que el diseño físico de la estructura debe cuidarse para asegurarse que con este nuevo material se siguen cumpliendo las especificaciones reglamentarias, [2].

Aunque un asiento es parecido para coches, autobuses, autocares,... También contiene algunas diferencias, ya que cada vehículo está orientado a un uso y sus componentes también, y esto se ve reflejado por ejemplo en los asientos de los distintos vehículos. En la Fig.10 puede verse un asiento de autocar.

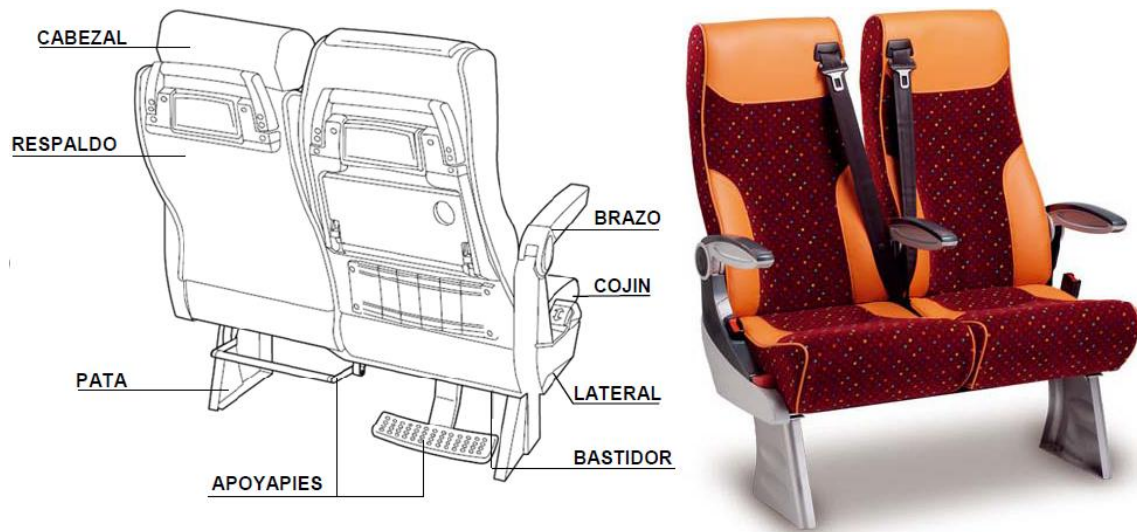


Fig. 10. Componentes de la gama IRATI, de Asientos Esteban, S.L., [7].

El asiento mostrado en la Fig. 10 combina a la perfección el equipamiento, diseño y seguridad de los pasajeros, junto con un gran confort y ergonomía, y un peso aproximado de tan solo 26 kg.

3.3. Innovación en diseño y métodos de producción de piezas de aluminio

Se estima que el porcentaje de aluminio en los elementos estructurales de los automóviles vaya ascendiendo con el paso de los años, incluso llegando a un 100 % en el caso de algunos vehículos ligeros.

Una de las claves para emplear más eficazmente las aleaciones de aluminio es que los diseños se adecuen al material, y no el material al diseño. Por ejemplo, una de las desventajas del aluminio, ya sea fundido, laminado, extruido,... es su precio superior respecto a las fundiciones férricas y aceros. Una de las posibles soluciones sería diseñar una parte del vehículo que con un número inferior de piezas para su montaje pueda tener la misma funcionalidad (Fig. 11), y con ello el precio unitario superior de cada pieza de aluminio se ve compensado por un

número total de piezas inferior. También, un menor número de piezas significa un menor tiempo de montaje, y costes lógicamente inferiores, [2].

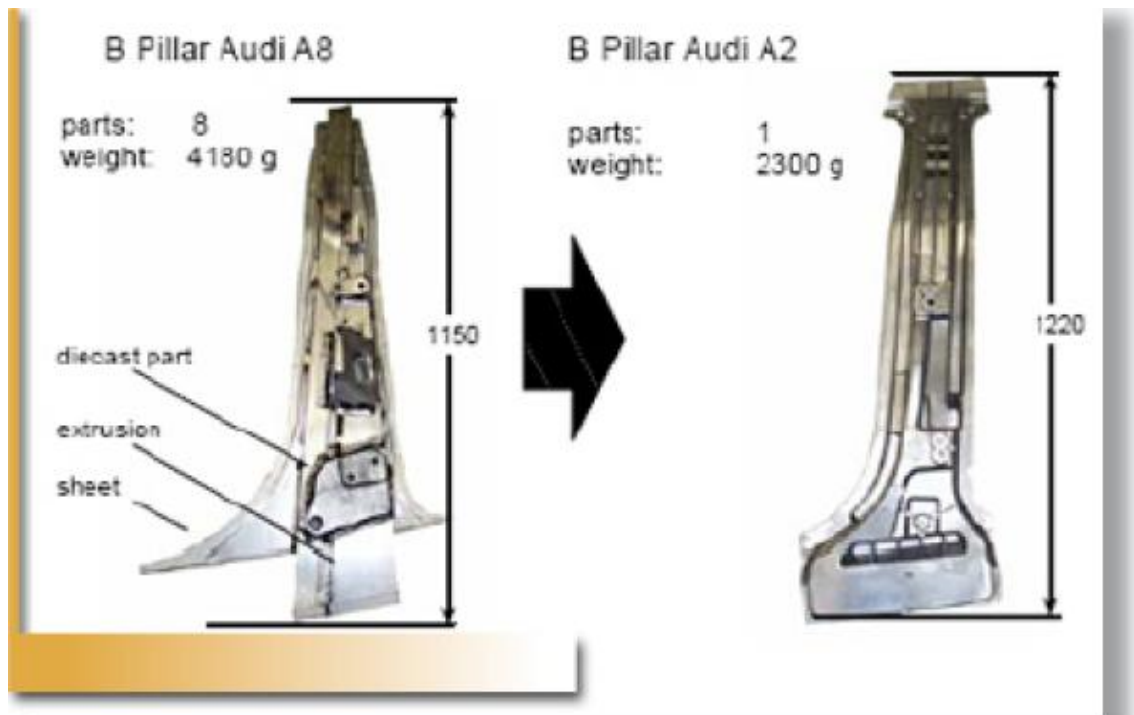


Fig. 11. Comparación del Pilar B del Audi A8 (1994-2003) con el del Audi A2 (1999-2005), [2].

En la Fig. 11 hay que aclarar que para una comparación de estos dos componentes de automóvil, hay que tener en cuenta que cada coche pertenece a un segmento y ha estado diseñado para unas pretensiones, cosa que se verá reflejado en el precio. El Audi A8 es un vehículo de lujo y el A2 es un utilitario.

Sin embargo, la relación entre las propiedades de un material y las de un componente fabricado con ese material es muy compleja, y puede estar fuertemente influenciada por la geometría de la pieza, ya que no existe una regla absoluta. En la práctica será necesario considerar individualmente cada componente del automóvil para determinar cuánto peso se puede reducir en total, [3].

También se puede estudiar flexibilizar más la producción.

El desarrollo de componentes estructurales de gran versatilidad que puedan emplearse en más de una plataforma, es una de las posibles soluciones para optimizar el diseño de las estructuras de vehículos. Algunos fabricantes están presentando proyectos de vehículos con una construcción relativamente modular, en la que algunos componentes estructurales clave son empleados en varios modelos de vehículos, con deseables consecuencias a nivel de costes. Esta solución aporta más flexibilidad a la hora del diseño, pero exige de una planificación muy cuidadosa, ya que el diseño de las piezas ha de ser suficientemente versátil, [2].

En la actualidad de la industria automotriz, un ejemplo real aplicando esta idea sería la siguiente:

Plataforma MQB del Grupo Volkswagen

La plataforma MQB del Grupo Volkswagen consiste en un bloque de construcción transversal modular, y designa una plataforma de automóvil que se emplea para vehículos de los segmentos B, C y D, con motor delantero transversal y tracción delantera o integral, como se puede ver en la Fig. 12. El primer modelo basado en la plataforma que ha salido ya al mercado, ha sido la tercera generación del Audi A3 (2012). Todos los coches basados en el MQB compartirán elementos del chasis, pero podrán variar su batalla (distancia entre ejes), ancho de eje y dimensiones de carrocería. Se estima que se usará en más de 30 modelos del gigante automovilístico alemán.



Fig. 12. Plataforma MQB del Grupo Volkswagen, [8].

Su equivalente para motores delanteros longitudinales, el MLB, es utilizada por Audi desde 2007, [4].

En la plataforma MQB aproximadamente el 50% de la estructura está compuesta por aceros de alta resistencia. Conformadas en caliente, estas aleaciones pesan lo mismo que el acero convencional, pero ofrecen una rigidez varias veces superior, y por eso se emplean en las zonas que tienen que soportar mayores pesos o tensiones. También se utilizan los aceros de alta resistencia por seguridad, en las zonas cuya deformación está programada para absorber

el máximo de energía ante un posible impacto. El resto de los componentes: travesaños, piezas portantes menores y gran parte del suelo del vehículo, están hechos de aleaciones de aluminio.

El nuevo Volkswagen Golf (séptima generación) se presentará para finales de 2012 y contará con la plataforma MQB. En este nuevo modelo también se invertirá una tendencia que hasta ahora parecía imposible de sortear: que con cada nueva generación de un vehículo el peso aumente. Todos los vehículos futuros basados en el MQB pesarán como mínimo 40 kg menos que sus antecesores directos. De esta manera es posible solucionar el problema continuo del aumento de peso, e invertirlo de manera sostenible. Como consecuencia se reducirá el consumo de combustible del automóvil, y a su vez descenderán las emisiones de gases contaminantes, protegiendo el medio ambiente y los recursos naturales. El futuro Golf pesará 40 kg menos que la sexta generación (2008-actualidad) gracias a la plataforma MQB, llegando a 60 kg en el caso concreto de la versión 1.4 TSi, por los 21 kg menos de su bloque motor de aluminio, [8].

4. Aleaciones de aluminio utilizadas en fundición

Las aleaciones de aluminio se pueden dividir en: aleaciones de forja o de moldeo.

La designación internacional de las aleaciones de aluminio es la establecida por la Aluminium Association (AA), como puede verse en la Tabla. 1.

Tabla. 1. Nomenclatura de las aleaciones de aluminio, [9].

Aleaciones de forja	Serie	Aleaciones de moldeo	Serie
Aluminio $\geq 99,00$ %	1XXX	Aluminio $\geq 99,00$ %	1XX.X
Cobre	2XXX	Cobre	2XX.X
Manganeso	3XXX	Silicio más Cobre y Magnesio	3XX.X
Silicio	4XXX	Silicio	4XX.X
Magnesio	5XXX	Magnesio	5XX.X
Magnesio y Silicio	6XXX	Series no utilizadas	6XX.X
Zinc	7XXX	Zinc	7XX.X
Otros elementos	8XXX	Estaño	8XX.X
Series no utilizadas	9XXX	Otros elementos	9XX.X

En este proyecto solo se profundizará en las aleaciones de aluminio por moldeo, ya que más adelante se estudiará un componente fabricado por la aleación de segunda fusión (creada mediante chatarra) L-2630, y se analizarán diferentes alternativas para mejorar la pieza que incluirá a las aleaciones de primera fusión (obtenidas a partir de la Bauxita) A356 y A357, por su posibilidad de poder conformarse en estado semisólido (Semi-Solid Metal, SSM) y poder recibir un tratamiento térmico posterior.

Las aleaciones de moldeo se utilizan en fundición para la fabricación de piezas obtenidas por colada del metal líquido en moldes de arena, en moldes de acero o por inyección a alta y baja presión, por tener una buena colabilidad (capacidad de llenar el molde por completo).

En la composición de las aleaciones de aluminio de forja o moldeo, los elementos de aleación que se encuentran se distinguen en tres grupos:

- Elementos de adición elevada como el cobre, magnesio, manganeso, silicio y zinc, donde su composición varía en % según la aleación.
- Elementos de adición inferior, con un contenido inferior al 1 %, como pueden ser: cromo, hierro, circonio, níquel y cobalto.
- Elementos de adición especial, los cuales no superan el 0,5 % y son destinados a las aleaciones de uso particular; estos elementos son el antimonio, berilio, plomo, estaño y plata.

Cada elemento aleante proporciona unas propiedades concretas a cada aleación de aluminio. Las principales características de cada aleante son las siguientes:

El silicio incrementa las propiedades de moldeo, como es la fluidez y la colabilidad.

El hierro sirve para mejorar la resistencia a altas temperaturas, pero al mismo tiempo disminuye la soldabilidad y ductilidad.

El cobre aumenta importantemente la ductilidad y la dureza de las aleaciones de aluminio de fundición tratadas o no térmicamente, pero reduce normalmente la resistencia a la corrosión.

El manganeso generalmente se considera una impureza y se controla a niveles bajos en muchas de las composiciones de moldeo por gravedad.

El magnesio es el pilar de la ductilidad y el endurecimiento de las aleaciones de aluminio-silicio tratadas térmicamente. También se utiliza en aleaciones más complejas que además contienen cobre, níquel y otros elementos con el mismo propósito.

El zinc solo proporciona aumentos de las características y propiedades de las aleaciones de aluminio, cuando va acompañado por la adicción de cobre y/o magnesio, en estos casos mejora los resultados de las aleaciones tratadas térmicamente o al realizar un envejecimiento natural, [9].

Como se ha explicado antes, en este trabajo interesan las aleaciones de aluminio-silicio, las cuáles son muy utilizadas para la fabricación de componentes de los automóviles. En la Tabla. 2 junto con la Tabla. 3 se muestran algunas equivalencias y designaciones para las tres aleaciones de aluminio de la serie 300 citadas antes.

Tabla. 2. Equivalencias de aleaciones de aluminio para moldeo, según país y norma, [10].

País	
EEUU	España
Norma	
(AA)	(UNE)
Nomenclatura	
A356	EN AC-42100
A357	EN AC-42200
380	EN AC-46500

Tabla. 3. Designaciones antiguas de las aleaciones de aluminio para moldeo correspondientes a España (UNE), [10].

Designación vigente EN 1706:2010		Designación antigua española		
Numérica	Simbólica	Numérica	Simbólica	Norma UNE Anulada
EN AC-42100	EN AC- AlSi7Mg0,3	L-2652	Al-7Si0,3Mg	38-241
EN AC-42200	EN AC- AlSi7Mg0,6	L-2653	Al-7Si0,6Mg	38-242
EN AC-46500	EN AC- AlSi9Cu3(Fe)(Zn)	L-2630	Al-9Si3Cu3ZnFe	38-263

La composición química de estas tres aleaciones de aluminio-silicio se muestra en la Tabla. 4.

Tabla. 4. Composición química de aleaciones de aluminio para moldeo, en porcentaje en masa, [10].

Elementos	Aleaciones de aluminio		
	L-2630	A-356	A-357
Si	8,0-11,0	6,5-7,5	
Fe	1,3	0,19	
Cu	2,0-4,0	0,05	
Mn	0,55	0,10	
Mg	0,05-0,55	0,25-0,45	0,45-0,70
Cr	0,15	—	
Ni	0,55	—	
Zn	3,0	0,07	
Pb	0,35	—	
Sn	0,15	—	
Ti	0,25	0,25	
Otros	0,25	0,10	
Aluminio	Resto		

En la Tabla. 4 la fila “Otros” no incluye elementos modificadores o afinantes como Na, Sr, Sb y P.

En la Fig. 13 se muestra el diagrama de equilibrio Al-Si donde se puede ver que las tres aleaciones formarían parte del grupo de los hipoeutéticos.

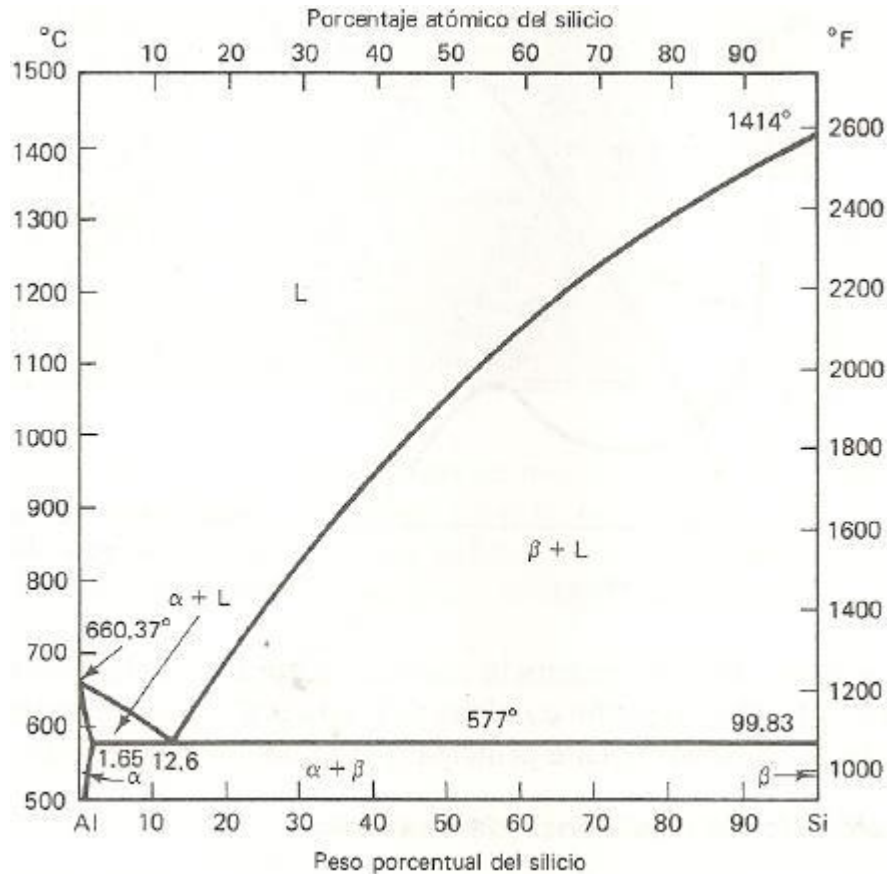


Fig. 13. Diagrama de fase del Aluminio-Silicio, [9].

Para la aleación L-2630 el proceso de moldeo convencional es la inyección a alta presión (High-Pressure Die Casting, HPDC), en cambio las aleaciones A356 y A357 pueden moldearse tradicionalmente en arena, coquilla o a la cera perdida (moldeo de precisión). A continuación, en la Tabla. 5 se muestran las aptitudes que tienen estos materiales cuando son fabricados mediante moldeo convencional.

Tabla. 5. Puntuación de las propiedades y características de las aleaciones de aluminio moldeadas tradicionalmente, [10].

Aptitudes para las diferentes características mecánicas		Aleaciones de aluminio		
		L-2630	A356	A357
Moldeabilidad	Fluidez	B	B	
	Resistencia a la agrietabilidad en caliente	B	A	
	Estanqueidad	B	B	
Maquinabilidad	Bruto de moldeo	B	—	
	Tras tratamiento térmico	—	B	
Otras propiedades	Resistencia a la corrosión	D	B	
	Anodizado decorativo	E	D	
	Soldabilidad	F	B	
	Aptitud para el pulido	C	C	
Características mecánicas	Resistencia a temperatura ambiente	B	A	
	Resistencia a temperatura elevada hasta 200 °C	A	C	
	Tenacidad (resistencia al impacto)	D	A	

A = Excelente, B = Bueno, C = Regular, D = Malo, E = No recomendado y F = Inapropiado.

La soldabilidad de piezas moldeadas a presión depende de la cantidad de gas ocluido y en la mayoría de los casos es muy mala. La tenacidad de una aleación está directamente relacionada con su alargamiento, cuanto mayor es el alargamiento mejor es la resistencia al impacto, [10].

La aleación L-2630 es una de las aleaciones de aluminio más utilizadas en la industria de la fundición, en una amplia gama de sectores: automovilístico, aeronáutico, industria pesada, ferretería,... Todo esto es debido a su combinación de excelentes propiedades mecánicas con un precio muy competitivo en comparación con otras aleaciones.

En fundición inyectada, esta aleación posee una gran colabilidad en estado líquido, gran resistencia a la rotura en altas temperaturas y buena estanqueidad. También tiene una excelente maleabilidad y una moderada resistencia a la corrosión debido a su contenido en cobre.

A causa de su porcentaje de silicio puede ser algo abrasiva, y en lo que se refiere a soldadura se desaconseja su utilización, [11].

Las aleaciones A356 y A357 dependen sobretodo de la forma y tamaño de las partículas de Si, de la cantidad de Mg presente y del tratamiento térmico de envejecimiento aplicado. Este tipo

de aleaciones se pueden tratar térmicamente gracias a la aportación de magnesio, y un aumento en su concentración mejorará la resistencia mecánica, y al mismo tiempo empeorará la ductilidad y tenacidad a fractura. El Mg se adiciona para crear la formación de precipitados coherentes precursores del componente intermetálico Mg_2Si .

A parte de que las aleaciones A356 y A357 son utilizadas para la fundición tradicional, resulta que en la conformación de componentes en SSM son las aleaciones más utilizadas, aunque siempre con un tratamiento térmico para mejorar sus propiedades mecánicas. El T6 es el que normalmente da la mejor relación de características mecánicas, [9].

5. Estudio de un componente de automoción inyectado a presión con la aleación L-2630

5.1. Descripción del componente

En este proyecto se ha estudiado un componente de automoción fabricado con la aleación de aluminio de L-2630, y moldeado por fundición a alta presión (HPDC). Como se puede ver en la Fig. 14. se trata del lateral de un asiento de autocar. Esta pieza tiene una función estética, y al mismo tiempo estructural. En su interior está el sistema de reclinación del asiento y en el exterior el pulsador de reclinación. Opcionalmente puede alojar el mando de audio. También incorpora el bulón de giro del apoyabrazos y el bulón sobre el que gira el respaldo. Estructuralmente se encarga de unir el respaldo con el cojín, y al mismo tiempo tiene que asegurar la integridad estructural del asiento, e intentar soportar toda clase de golpes y esfuerzos.



Fig. 14. Detalle lateral IRATI, [14].

Todos los procedimientos experimentales fueron desarrollados en los laboratorios del Centro de Diseño de Aleaciones Ligeras y Tratamientos de Superficie (CDAL), así como en los laboratorios del Departamento de Ciencia de los Materiales en Ingeniería Metalúrgica (CMEM) de la Escuela Politécnica Superior de Vilanova i la Geltrú (EPSEVG).

El único proceso experimental realizado fuera de las instalaciones de la EPSEVG, basado en un ensayo mecánico de fractura del componente de aluminio, fue realizado en el departamento de I+D de la empresa que fabrica el lateral de automoción. En la Fig. 15 se muestra la pieza antes de comenzar con el procedimiento experimental.



Fig. 15. Lateral IRATI con los canales de colada y las mazarotas aun conectadas al componente.

El objetivo de este procedimiento experimental respecto a este componente, es conocer si el lateral cumple con las exigencias mecánicas para las que ha estado diseñado y si cuenta con defectos, aunque de todas formas se estudiaran otras alternativas para mejorar dicha pieza cambiando la aleación, el proceso de conformación y pudiendo aplicar un tratamiento térmico posterior que en el HPDC no se puede emplear.

5.2. Procedimiento experimental

Debido al dimensionado del componente objeto de estudio, el paso previo a la extracción de muestras se ha basado en la sección de dicho componente en tres partes y/o secciones (Figs. 16, 17 y 18), efectuada mediante la utilización de una sierra manual (Fig. 17), y posibilitando de esta manera su posterior introducción en la tronzadora manual (Fig. 19).

Después de obtener las tres secciones, éstas sí se pueden cortar en trozos más pequeños para conformar muestras de un tamaño dado, para no tener problemas al realizar la embutición en caliente, con la cual se elaborarán las probetas que se utilizarán para el análisis en el microscopio óptico. Los fragmentos no deben superar los 25 mm de longitud; si se supera esta medida el trozo cortado no cabe en el compartimiento de embutición de muestras.

Las razones por las que es preferible utilizar una tronzadora en lugar de una sierra manual siempre que sea posible, reside en el hecho de que con la tronzadora se consiguen mejores resultados y en un menor tiempo, además de controlar en todo momento el calentamiento de la muestra durante el corte, evitando el sobrecalentamiento del material y al mismo tiempo cambios microestructurales en el mismo.

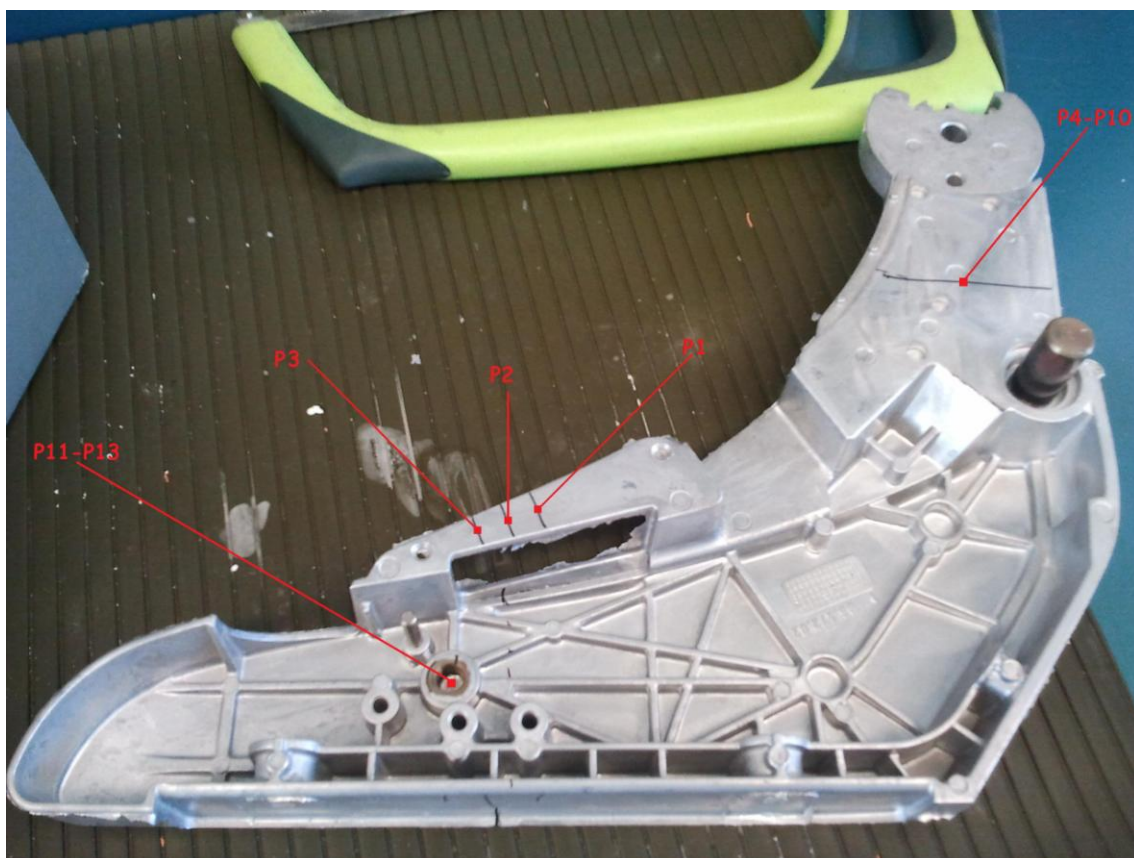


Fig. 16. Plano de seccionado del componente objeto de estudio y localización de las distintas muestras.

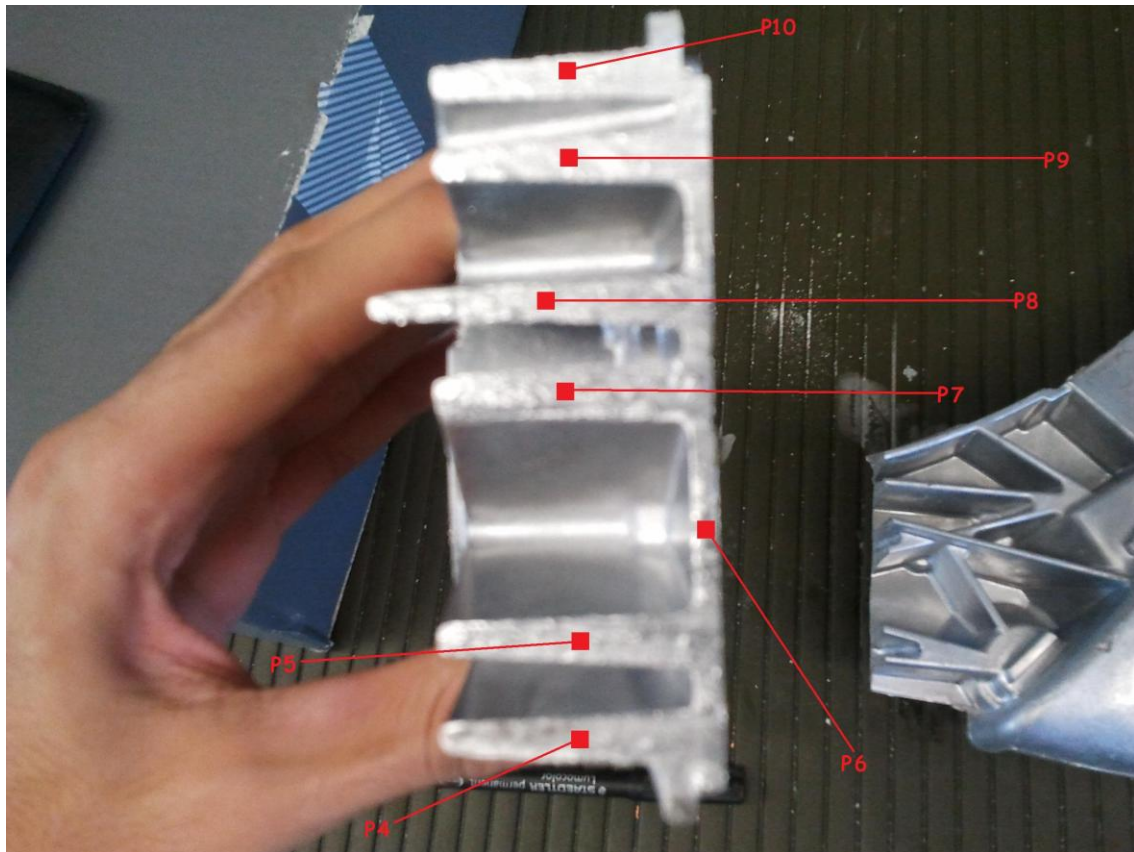


Fig. 17. Plano de localización de muestras de la sección.

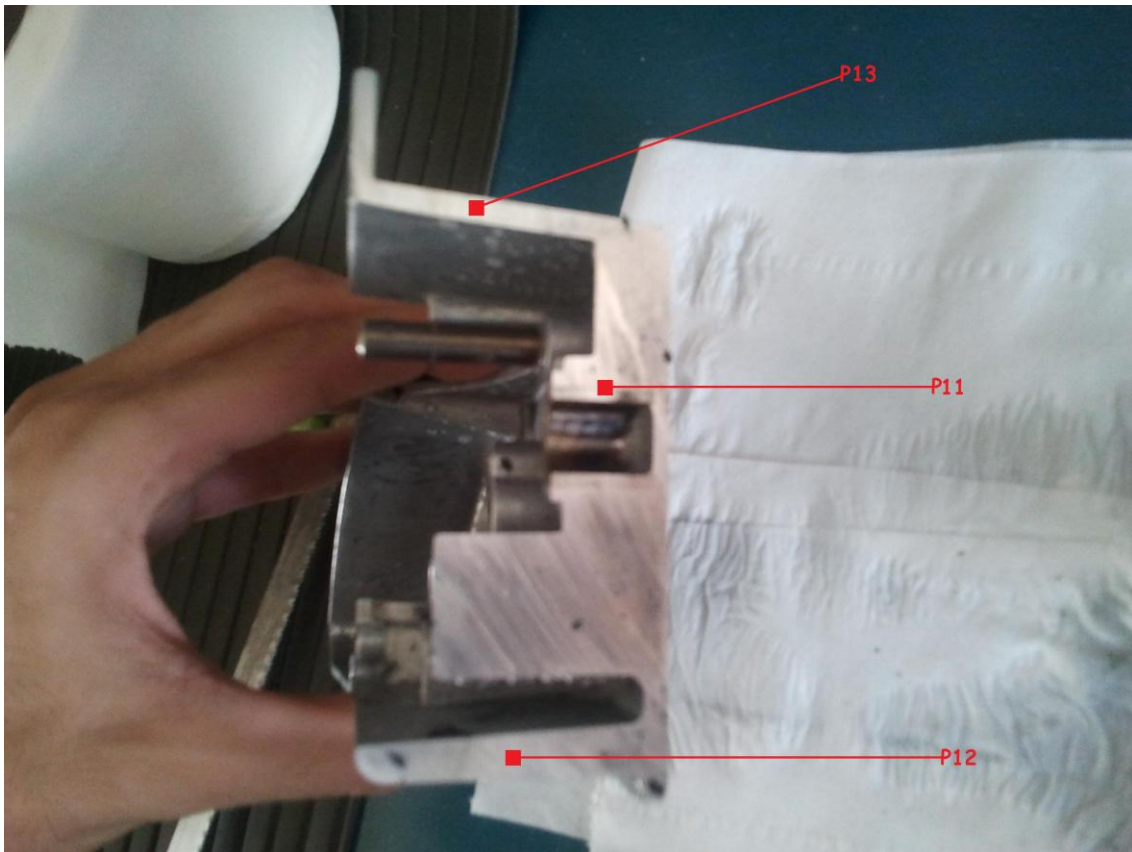


Fig. 18. Plano de localización de muestras de la seccion.

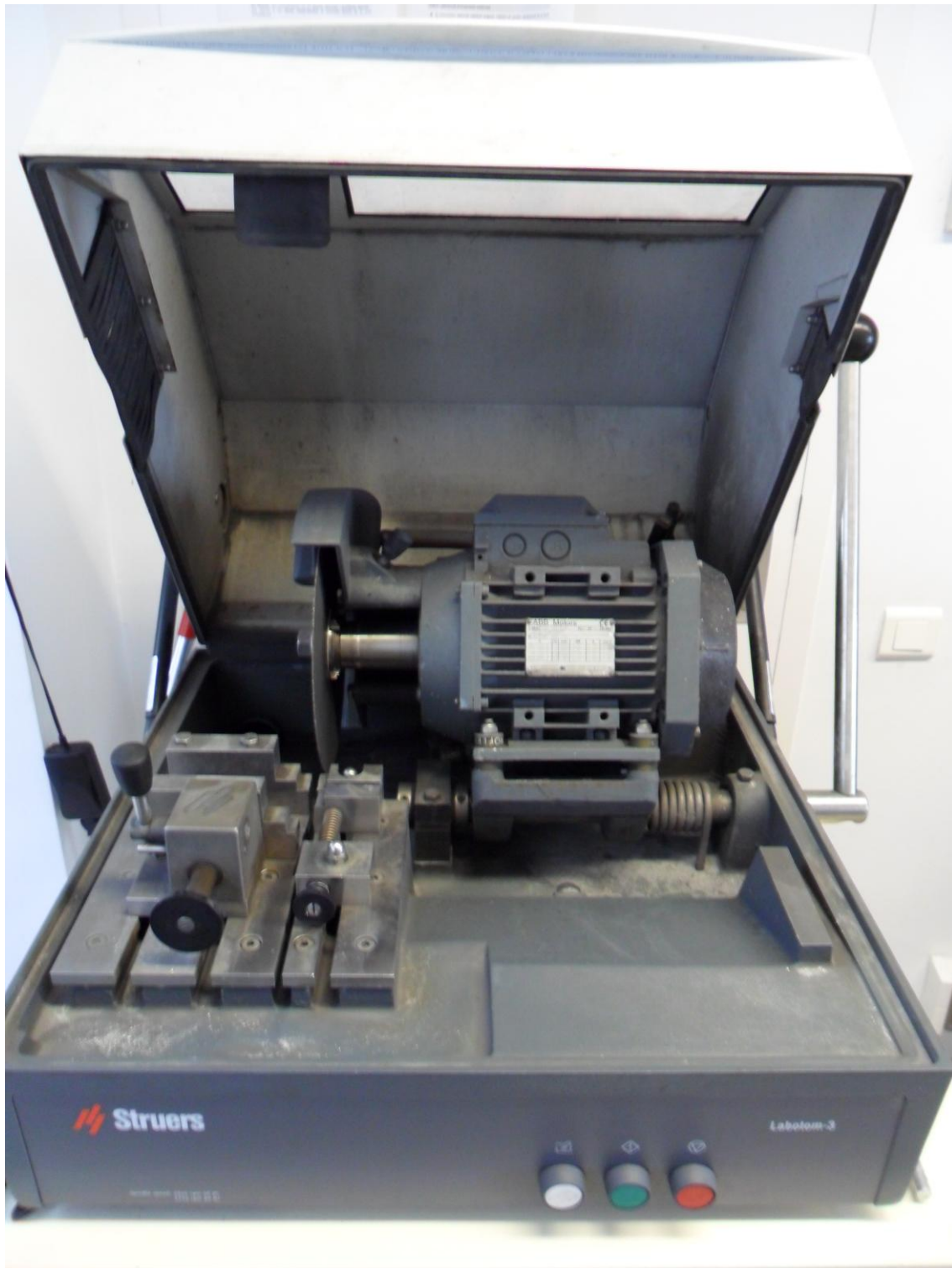


Fig. 19. Tronzadora refrigerada Struers Labotom-3.

La preparación de las muestras metalográficas, así como las operaciones siguientes de desbaste y pulido de las muestras metalográficas se ha realizado siguiendo las especificaciones presentes en la normativa ASTM E-03-01 "Guide for Preparation of Metallographic Specimen".

Una vez seccionado el componente y posteriormente extraídas las muestras a estudiar, se ha procedido a la embutición en resina de las mismas mediante la utilización de una prensa de montaje de probetas.

Para la elaboración de las probetas metalográficas se han seguido los siguientes pasos:

- Después de comprobar los ajustes previos para el correcto funcionamiento de la máquina, que vemos en la Fig. 20. dispondremos de todo para la realización de las muestras de resina.
- Luego bajamos el pistón 2,5 veces del volumen final de la probeta y llenamos el compartimento con la resina correspondiente (Fig. 21).
- Posteriormente tapamos el compartimento para que quede bien roscado, seleccionamos los parámetros correspondientes expuestos en la Tabla 6. para que la resina solidifique bien, y esperamos hasta que la máquina termine.
- Finalmente desenroscamos la tapa y ya tenemos la probeta lista para ser marcada y los posteriores ensayos.



Fig. 20. Prensa de montaje de probetas Struers LaboPress-3.



Fig. 21. Resina “Multi-Fast Negra” para el montaje de las muestras.

Tabla 6. Indicaciones de la resina para elaborar probetas.

Temperatura °C	150
Tiempo calentamiento min.	7
Presión KN	20
Tiempo enfriamiento min.	3

Para un acabado óptimo de las probetas, se realiza el desbaste y pulido de éstas. Para tal fin, utilizaremos la máquina que se muestra en la siguiente imagen:



Fig. 21. Pulidora automática Struers Dap-7.

Esta preparación mecánica de las muestras metalográficas es un método para la examinación microscópica. Se utilizan partículas de abrasivos para pulir el material de la superficie, hasta el resultado requerido.

Para llegar al resultado deseado se irá desbastando y puliendo la probeta sobre la cara a ensayar, con diferentes papeles de carburo silicio y paños de pulido, añadiendo a la vez lubricantes como agua, agua destilada o abrasivos dependiendo del resultado que se quiera obtener.

Al realizar el cambio de los papeles y paños, siempre rociaremos con agua abundante la superficie y frotaremos con un cepillo destinado a esa acción, para evitar que pequeñas partículas se incrusten o se queden en el papel o paño.

La preparación de las probetas se divide en dos pasos que se muestran a continuación en la Tabla. 7 y Tabla. 8.

Tabla. 7. Operaciones y/o etapas de desbaste.

	1° Papel	2° Papel	3° Papel	4° Papel	5° Papel
Superficie	Disco-pulido	Disco-pulido	Disco-pulido	Disco-pulido	Disco-pulido
Abrasivo	SiC	SiC	SiC	SiC	SiC
Tamaño de grano	#220 (220 partículas /mm ²)	#500 (500 partículas /mm ²)	#800 (800 partículas /mm ²)	#1200 (1200 partículas /mm ²)	#4000 (4000 partículas /mm ²)
Lubricante	Agua	Agua	Agua	Agua	Agua
r.p.m.	300	300	300	300	300
Fuerza N	15/muestra	15/muestra	15/muestra	15/muestra	15/muestra
Tiempo min.	10	10	10	10	10
Modo	Automático	Automático	Automático	Automático	Automático

Tabla. 8. Operaciones y/o etapas de pulido.

	Alúmina de 1 micra	Alúmina de 0,3 micras
Superficie	Paño de fibras sintéticas	Paño de fibras sintéticas
Abrasivo	Alúmina (Al ₂ O ₃)	Alúmina (Al ₂ O ₃)
Tamaño de grano	1 µm	0,3 µm
Lubricante	Agua destilada	Agua destilada
r.p.m.	150	150
Fuerza N	10	10
Tiempo min.	5	5
Modo	Manual	Manual

Después de desbastar y pulir las probetas, lo primero es pasarles agua abundante para evitar que el abrasivo, en este caso la alúmina, se seque y queden partículas sólidas que puedan rayar la pieza. Después se rociarán con alcohol para facilitar el secado.

A continuación se mirará si las probetas están perfectamente pulidas. Si no se ve a simple vista, se puede ir al microscopio óptico y ver si tienen alguna raya o suciedad.

En el caso de que las probetas tuvieran rayas causadas por la solidificación de partículas de alúmina, se tendría que volver al papel de carburo de silicio #4000 hasta que la superficie quede sin rayas profundas.



Fig. 22. Ejemplo de papeles utilizados para el desbaste.

Para mantener las probetas secas y deshidratadas, se introducen en un desecador (Fig. 23).



Fig.23. Desecador de probetas.

6. Resultados y discusión de los resultados

6.1. Análisis micrográfico

El estudio metalográfico se ha realizado según las normativas: ASTM E3-01 (2007), ASTM E112-10, ASTM E930-99 (2007), ASTM E1181-02 (2008), ASTM E1382-97 (2010) y ISO 8503-3: 1988.

La estación de análisis de imagen utilizada para la realización de este análisis micrográfico consta del microscopio óptico Leica MEF4AM. Este equipo puede observarse en la Fig. 24.

Este microscopio óptico tiene una videocámara conectada al ordenador, el cual cuenta con un software de análisis de imagen instalado. El programa para la visualización de las muestras se llama "Qwin" (de la marca LEICA) y el programa para la edición de imágenes se llama "PaintShop Pro 4".



Fig. 24. Estación de análisis de imagen.

6.1.1. Porosidad

La aleación de Al-Si L-2630 tiene un contenido alto de impurezas, cosa que reduce las propiedades del componente estudiado. Estas piezas pueden tener defectos por la solidificación errónea y no controlada del material, como los rechupes, que estarían vacíos por dentro, y que se originan en zonas másicas de material y cambios de sección. Además, el proceso de inyección a presión utilizado provoca altos niveles de absorción de gases del metal líquido en el momento de la fabricación. También, el hecho de que el metal líquido entre en el molde con un régimen turbulento implica el atrapamiento de los gases presentes en el interior del moldeo. Se pueden distinguir como defectos por la inyección los poros (dentro hay aire), habiendo dos formas de porosidad. La microporosidad se encuentra repartida por todo el material y se encuentra sobretodo en la zona eutéctica, y en cambio la macroporosidad es la que se verá en las siguientes imágenes. Normalmente, en piezas de este tipo se pueden encontrar niveles de porosidad en las zonas más críticas (cambios de sección y zonas gruesas) de entre 2-5 %.

Igualmente, la fundición inyectada es la causa de que no se le pueda aplicar tratamientos térmicos a piezas como esta, ya que dicho proceso de moldeo propiciaría la existencia de gases ocluidos que nuclearían, formarían ampollas y burbujas, y se producirían deformaciones en el material (se perdería la forma). En caso de aplicar un tratamiento térmico y que no hubiera espacio para que el componente se deformara, este se rompería.

Las Figs. 25, 26 y 27 muestran las porosidades de las diferentes secciones obtenidas.

Las secciones representadas en la Fig. 25 corresponderían a las más porosas de las zonas analizadas; las representadas en la Fig. 26 a las que cuentan con menos porosidad. Se encontraría, tanto poros con una forma perfectamente redonda, como otros con formas más puntiagudas y raras. Los poros más circulares serían los representados por la Fig. 25.

En cambio, si nos referimos al tamaño de los poros, en las secciones representadas en la Fig. 27 se encontrarían los poros más grandes, de hasta 750 μm de diámetro aproximado. La porosidad mostrada en la Fig. 25 representaría una serie de poros de tamaño no superiores a las 400 micras de diámetro. En la Fig. 26 se representan poros de un tamaño máximo de 300 μm . Los diámetros que se acaban de mencionar son aproximados, ya que los poros tendrían que tener una forma completamente redonda para que los resultados fueran más certeros.

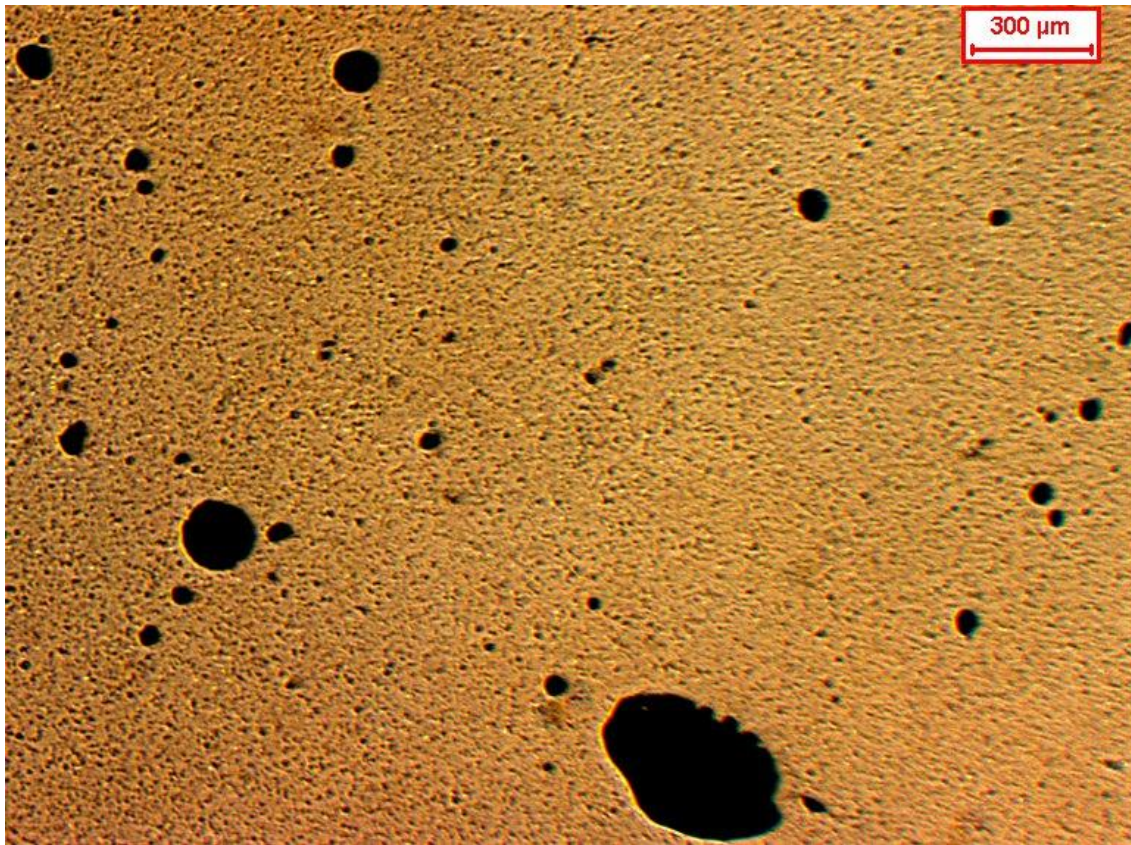


Fig. 25. Ejemplo de la porosidad de las secciones P1, P2 y P3, con 25 aumentos.



Fig. 26. Ejemplo de la porosidad de las secciones P4-P10, con 25 aumentos.

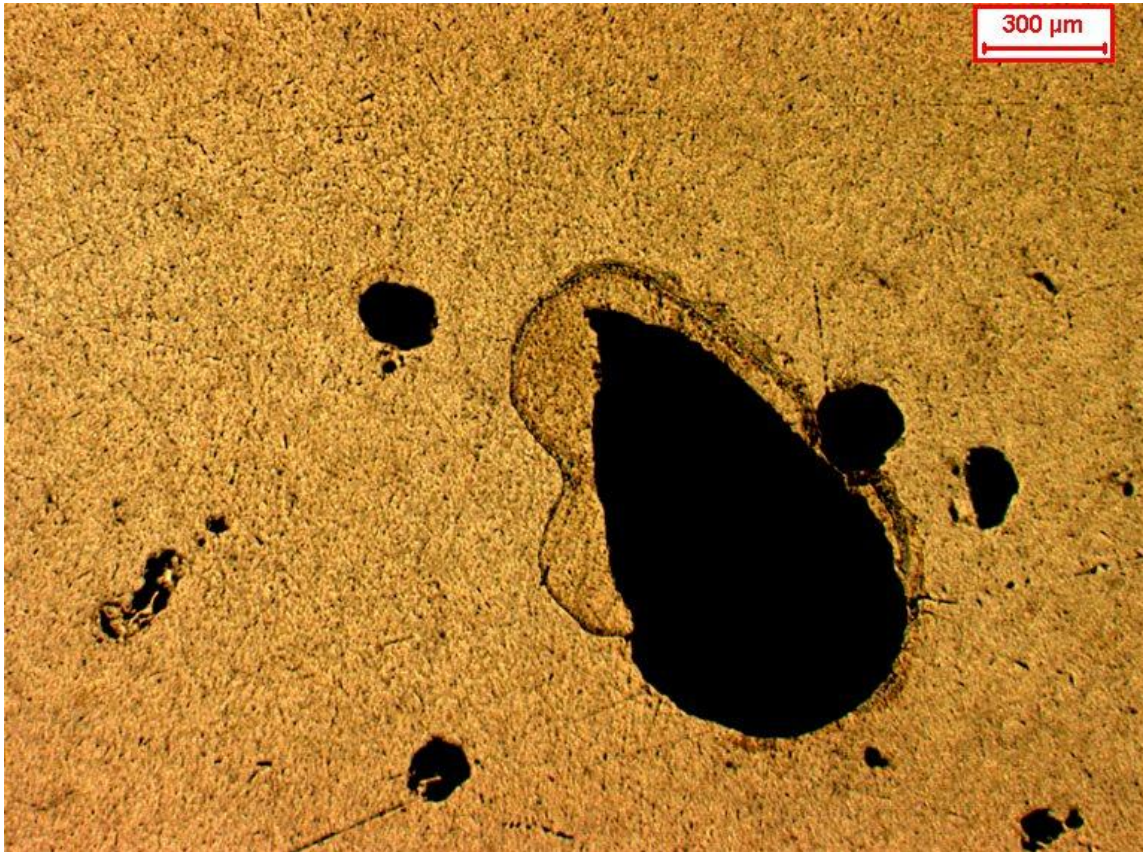


Fig. 27. Ejemplo de la porosidad de las secciones P11, P12 y P13, con 25 aumentos.

6.1.2. Análisis microestructural

La microestructura de este componente es la esperada de una aleación de Al-Si de segunda fusión, y fabricada por HPDC. En esta pieza, la microestructura permanece invariable dependiendo de la sección estudiada, como se muestra en la Fig. 28.

La microestructura del lateral de automoción muestra una estructura dendrítica modificada (dendritas de puntas redondeadas) de fase alfa y aluminio primario (α -Al), rodeadas de microconstituyente de fase eutéctica interdendrítica. La microestructura muy cercana a la superficie de la sección estudiada se basa en una fase alfa más pequeña rodeada de microconstituyente eutéctico más grueso, como se observa en la Fig. 29. También se pueden apreciar precipitados de silicio primario en forma de partículas poliédricas, con un tamaño que no excede de 20 μm por lado aproximadamente, ya que supone un cuadrado perfecto con medidas de ancho y alto. Se encuentran principalmente compuestos intermetálicos de hierro de tipo: aciculares en forma de agujas del tipo β -AlFeSiMn, y en forma globular llamados “escritura china” del tipo α -FeSiMn.

Los polígonos de silicio primario son muy duros, y dada su forma, son concentradores de tensiones que reducen la maquinabilidad del componente, aunque también mejoran la

resistencia al desgaste de la pieza. En cambio, las formas globulares de los compuestos intermetálicos α -FeSiMn, hacen mejorar la dureza y resistencia a la fractura del lateral, parámetros muy solicitados en los distintos ensayos mecánicos que se emplean. Las agujas de hierro son un compuesto intermetálico no deseado ya que son acumuladores de tensiones.

En las Figs. 30 y 31 se muestran distintos elementos localizados en las micrografías.

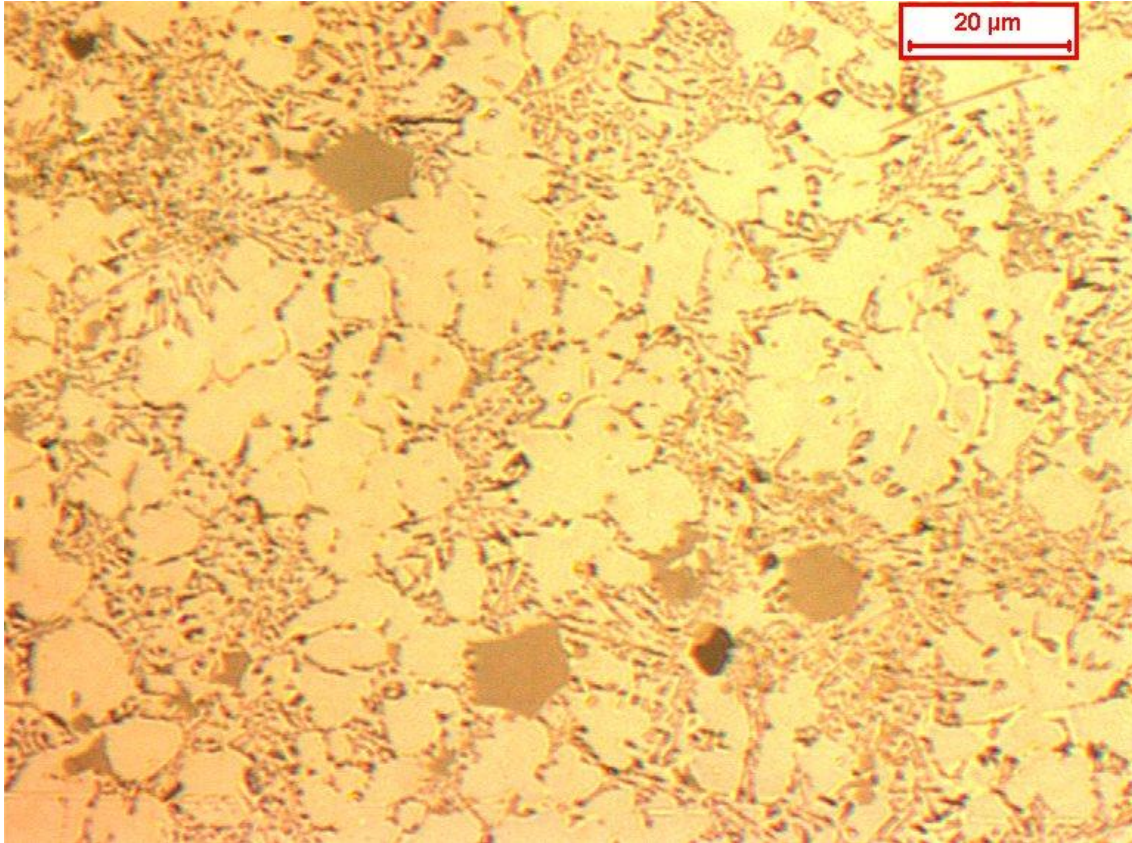


Fig. 28. Microestructura del componente estudiado, con 500 aumentos.

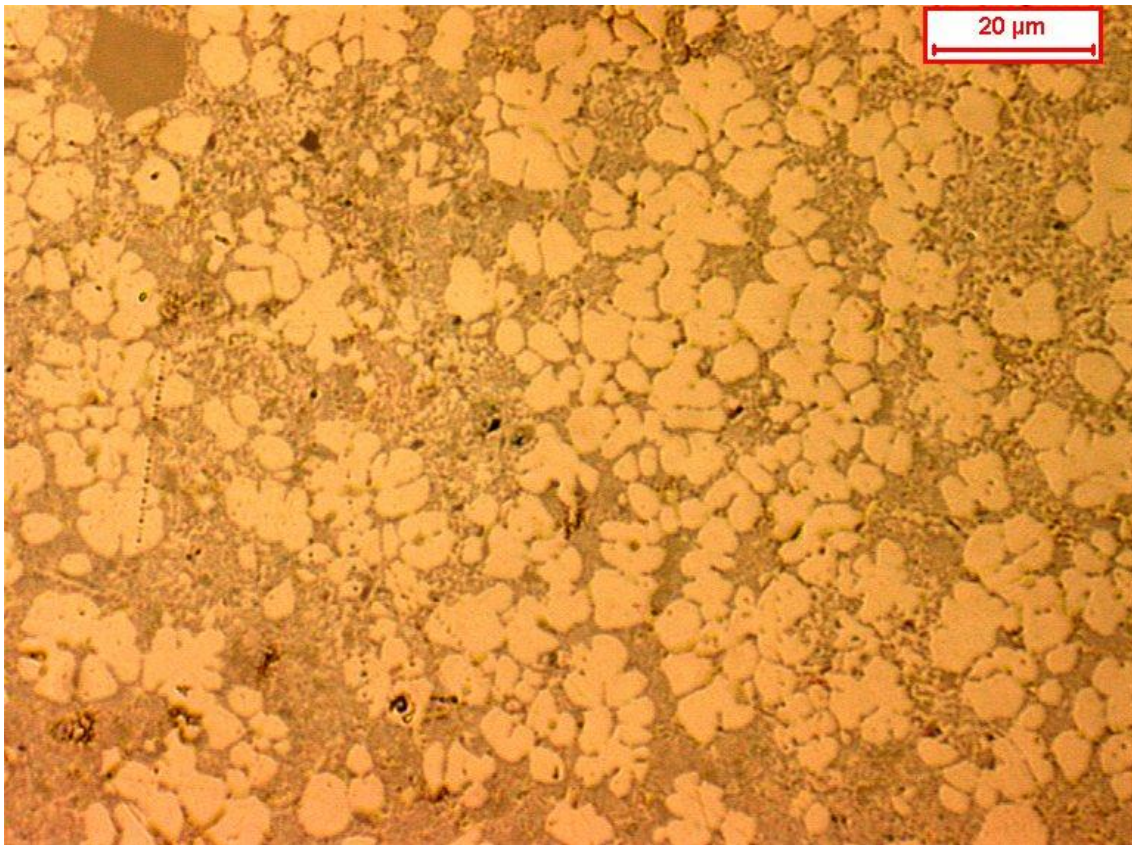


Fig. 29. Microestructura del componente estudiado cuando se trata de una zona cercana a la superficie, con 500 aumentos.

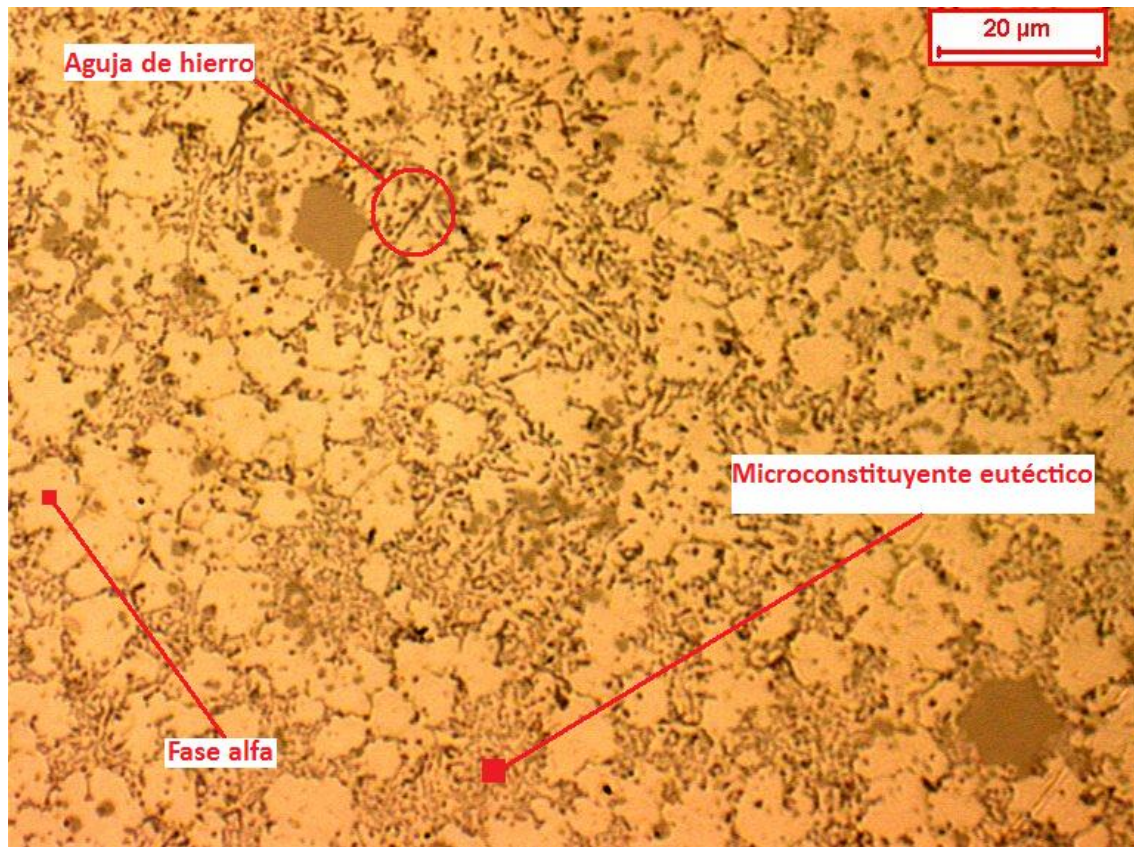


Fig. 30. Microconstituyentes localizados en las micrografías, con 500 aumentos.

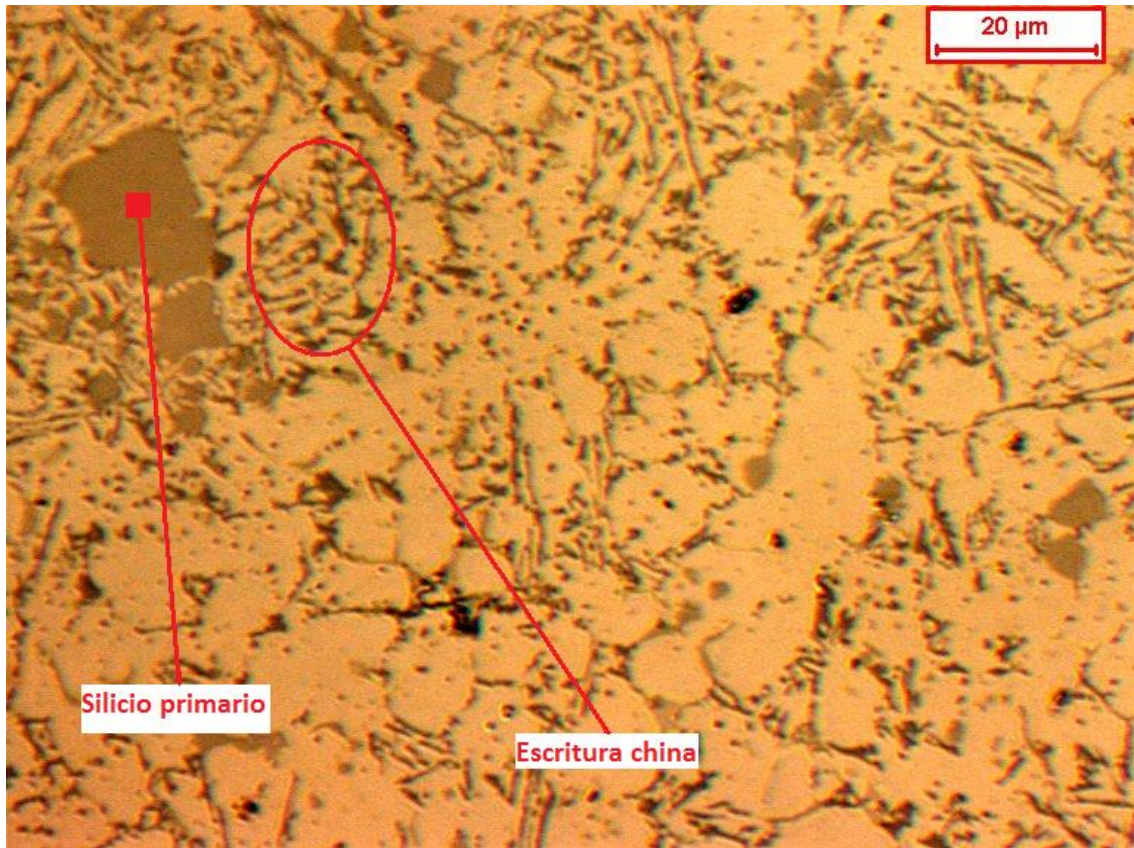


Fig. 31. Microconstituyentes localizados en las micrografías, con 500 aumentos.

6.2. Ensayo de rotura

La empresa que fabrica el componente objeto de estudio, ha realizado en sus instalaciones un ensayo de rotura. Aunque la pieza tiene impurezas y poros, esta se fractura por zonas sanas. La fractura del lateral IRATI es debida a sus discretas propiedades mecánicas, y sobretodo su casi inexistente porcentaje de alargamiento a la rotura. Aunque el componente cumple con las exigencias mecánicas para las que se ha diseñado, al efectuar el ensayo se comprueba que este no se deforma, sino que se rompe frágilmente por dos partes de su cuerpo.

En dicho ensayo, el conjunto estaría formado por el componente de automoción sobre una bancada rígida y la máquina utilizada sería un banco de ensayo universal de estructuras. A continuación se expondrán los pasos a seguir para realizar esta prueba:

- Se realiza el ensayo aislando el lateral.
- Se amarra el prototipo a la bancada rígida.
- Se tira horizontalmente a través de una palanca y tubo de respaldo rígidos, y a una altura de 430 mm por encima del eje de giro.
- En las Figs. 32 y 33 se puede ver la disposición del componente de aluminio antes de proceder al ensayo.

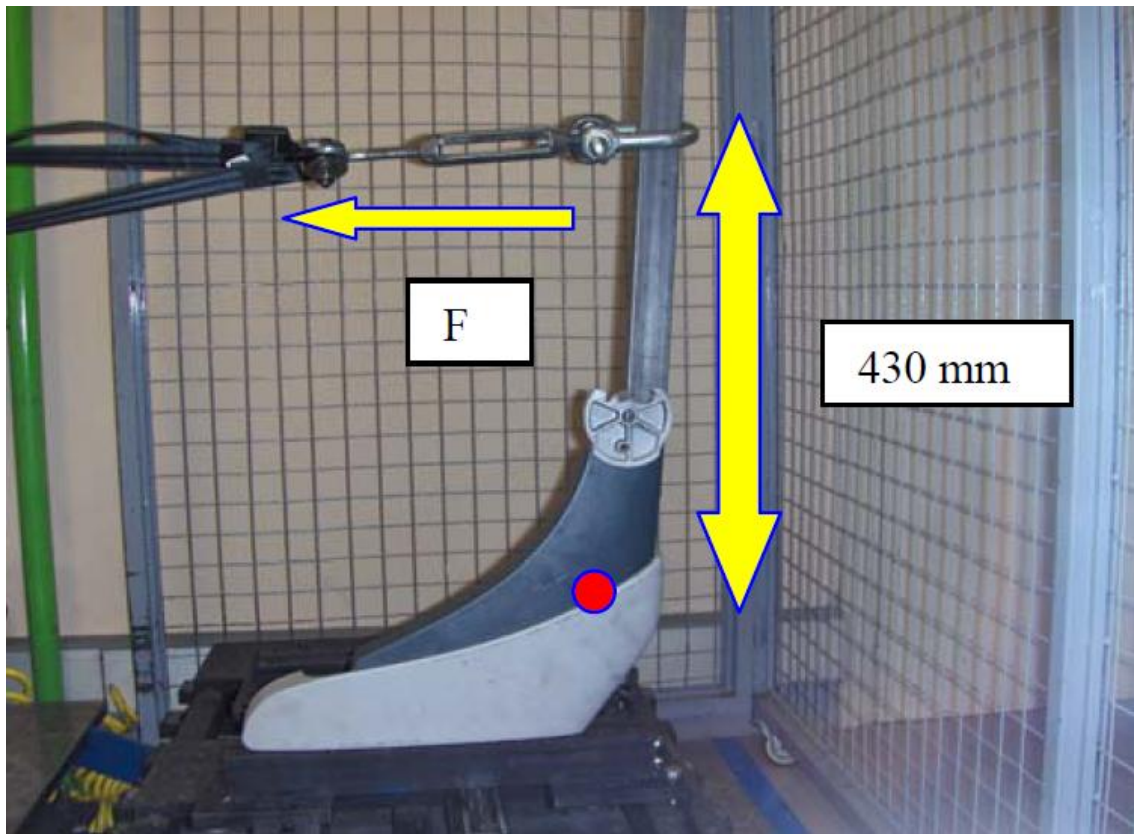


Fig. 32. Aplicación de cargas.

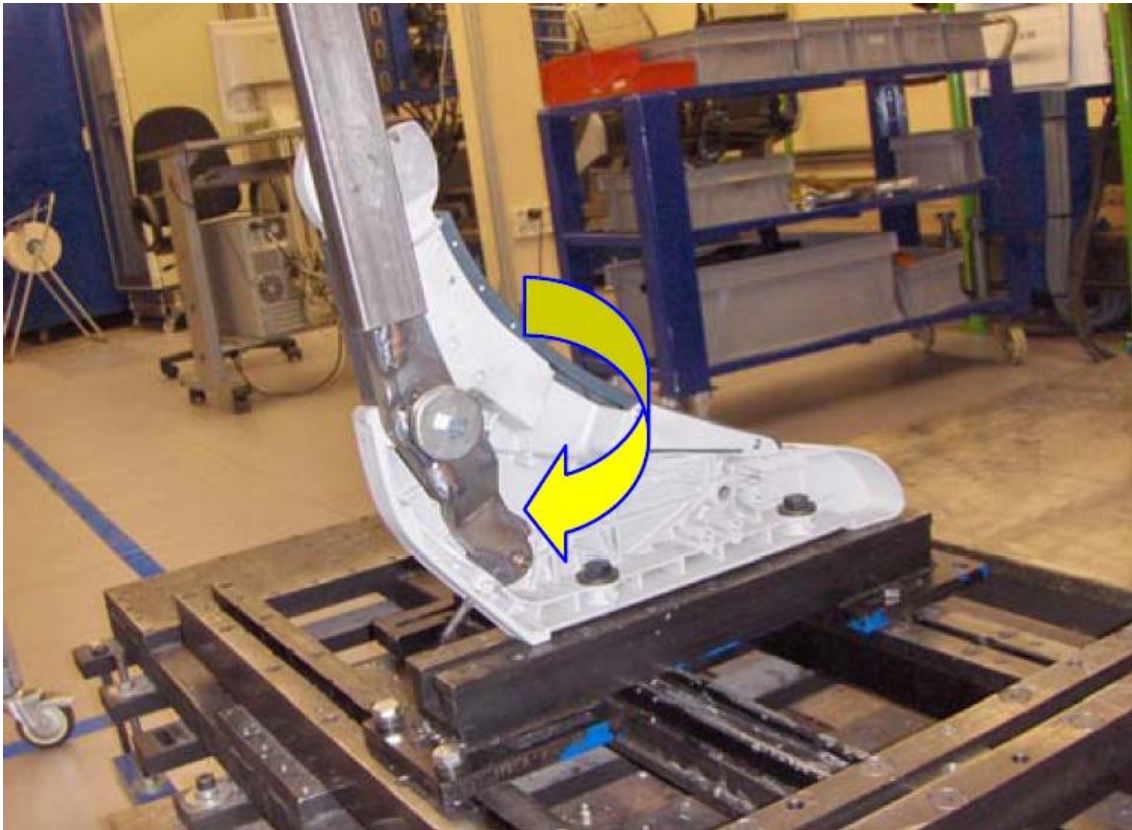


Fig. 33. Simulación de palanca de respaldo rígida.

El objetivo principal de este ensayo mecánico se ha basado en el estudio del punto de rotura del componente, dando como resultado que el prototipo IRATI rompe con una carga aplicada de 341 kg. En las Figs. 34 y 35 se contempla uno de los lugares por los que se ha fracturado la pieza.

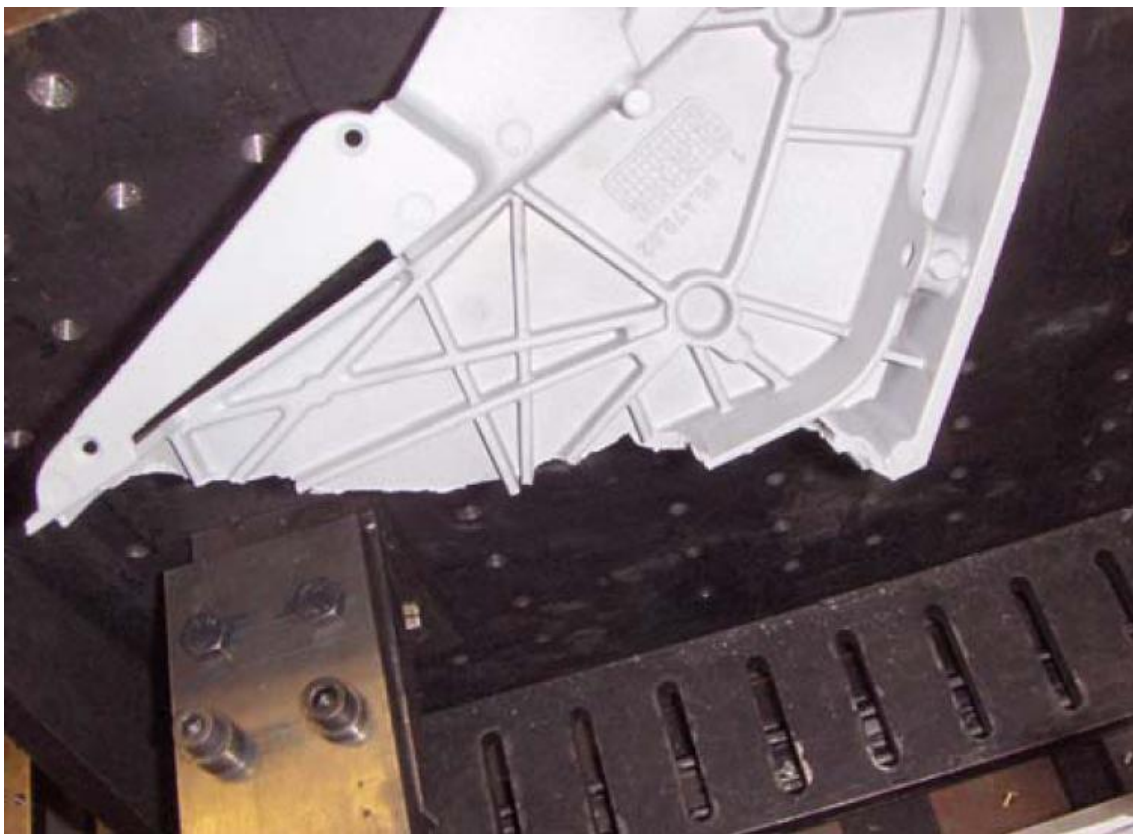


Fig. 34. Detalle rotura.

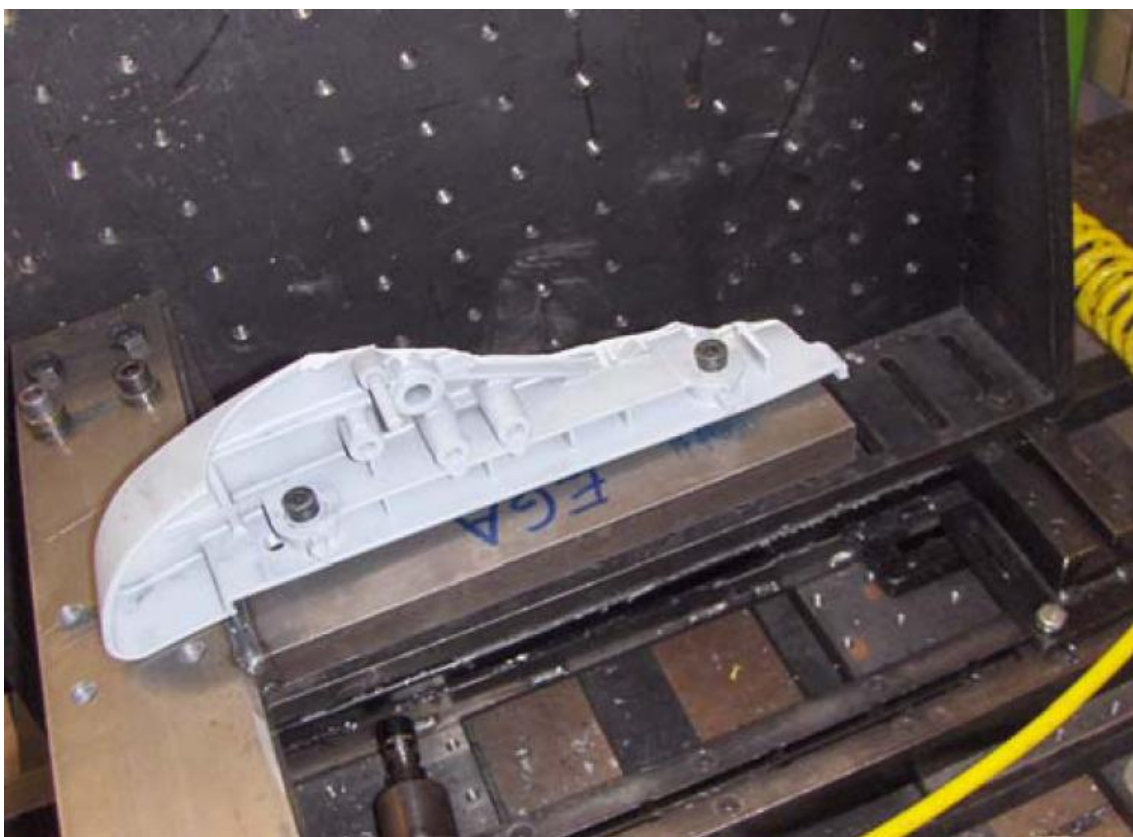


Fig. 35. Detalle rotura.

Seguidamente se mostraran los imágenes más relevantes obtenidas directamente en el momento del ensayo, en su respectivo orden de tiempo (Figs. 10-14). En las Figs. 15 y 16 aparecen dos gráficos obtenidos de uno de los dos documentos, también entregados por parte de dicha empresa; ambos gráficos describen el ensayo mediante la fuerza aplicada respecto al tiempo y con la distancia recorrida respecto al tiempo. La diferencia es que en el gráfico de la Fig. 16 pueden apreciarse mejor esta relación de valores de diferentes magnitudes y en la Fig. 15 se ven todos los valores y parámetros más fácilmente al ser más grandes.

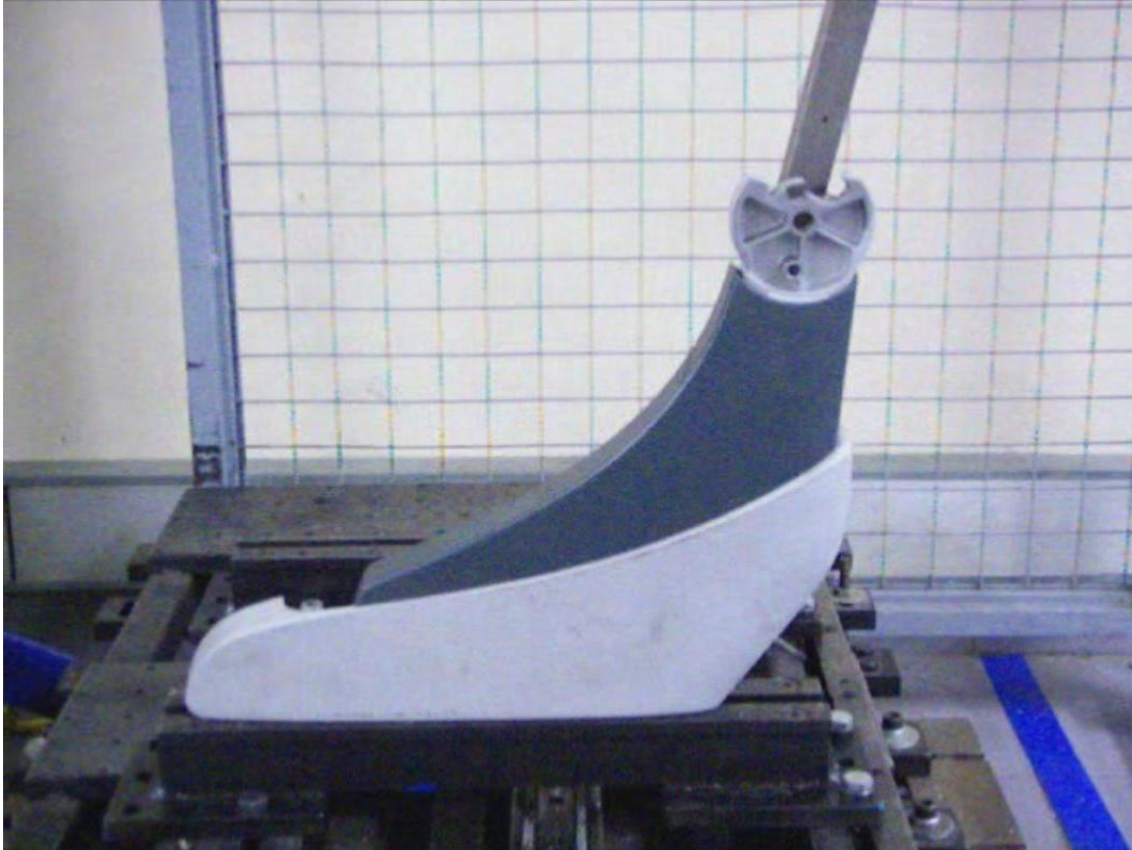


Fig. 36. Comienzo del ensayo de rotura del componente objeto de estudio.

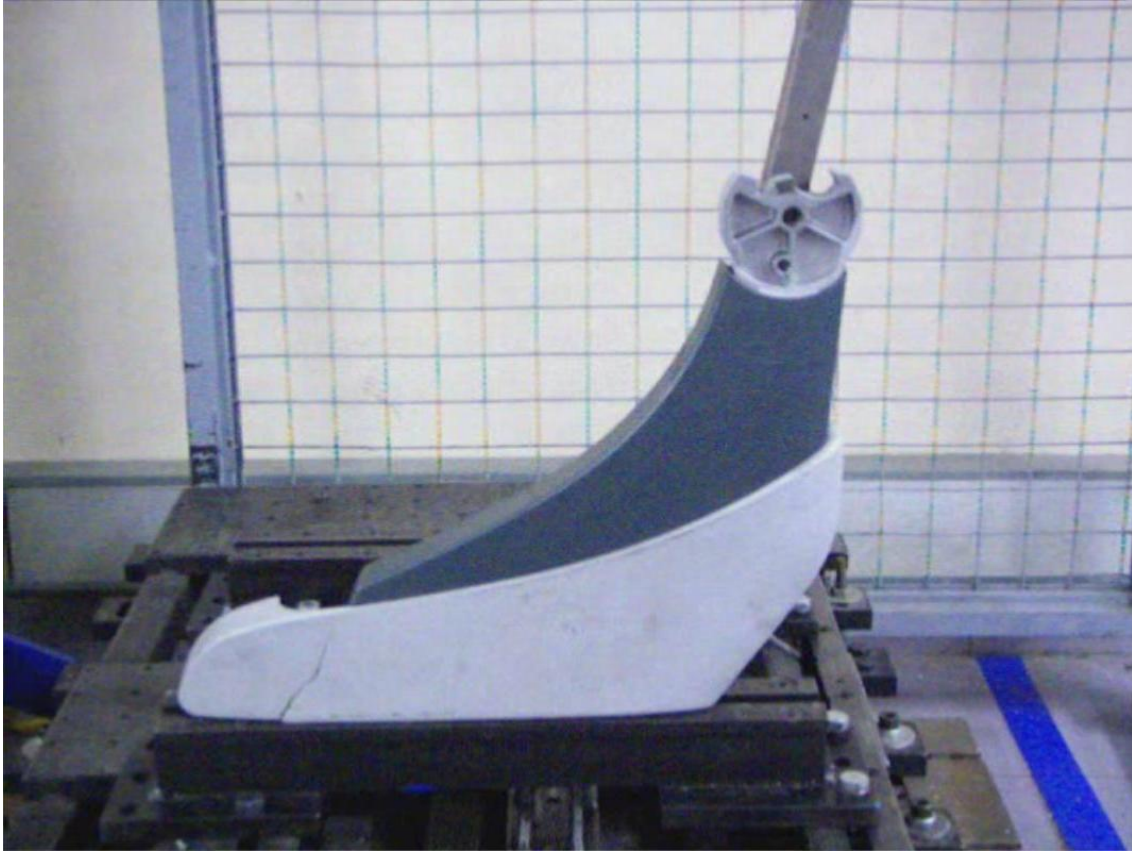


Fig. 37. Aparición de la primera grieta en la pieza.

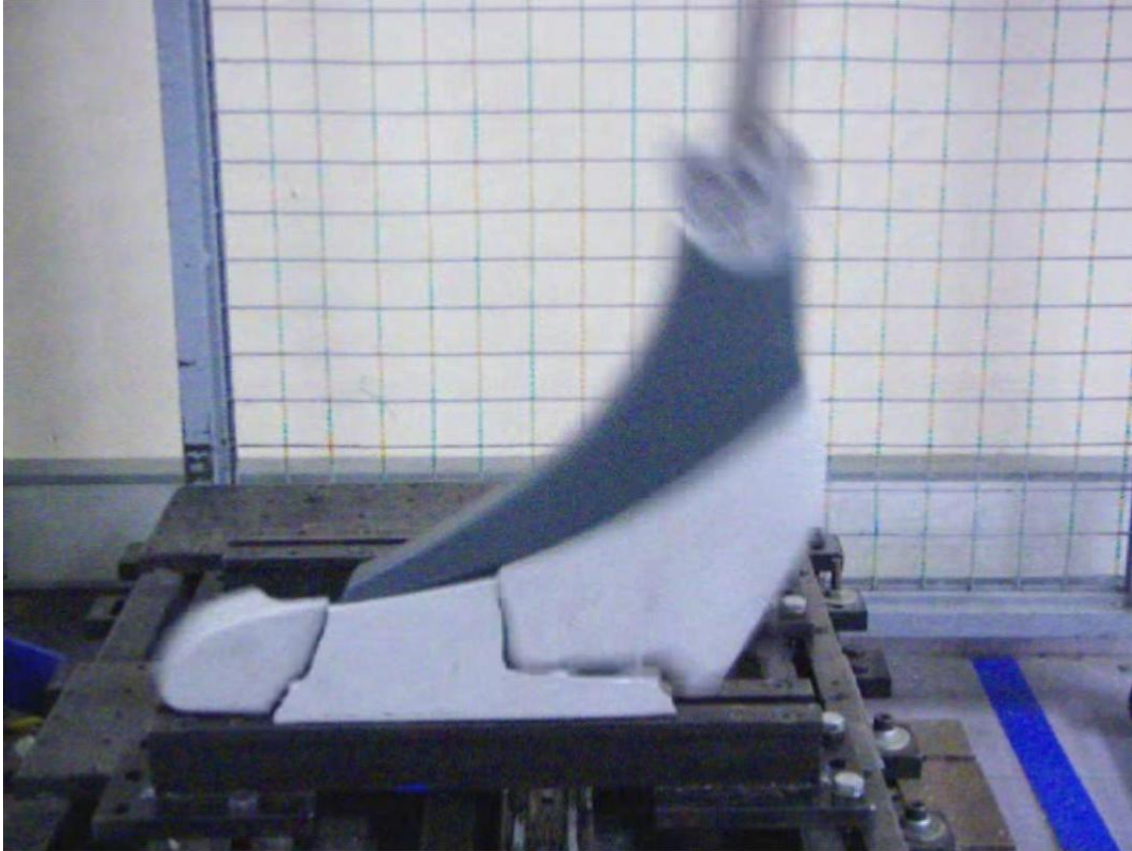


Fig. 38. Rotura del lateral por donde se creó la primera grieta y por una nueva zona.

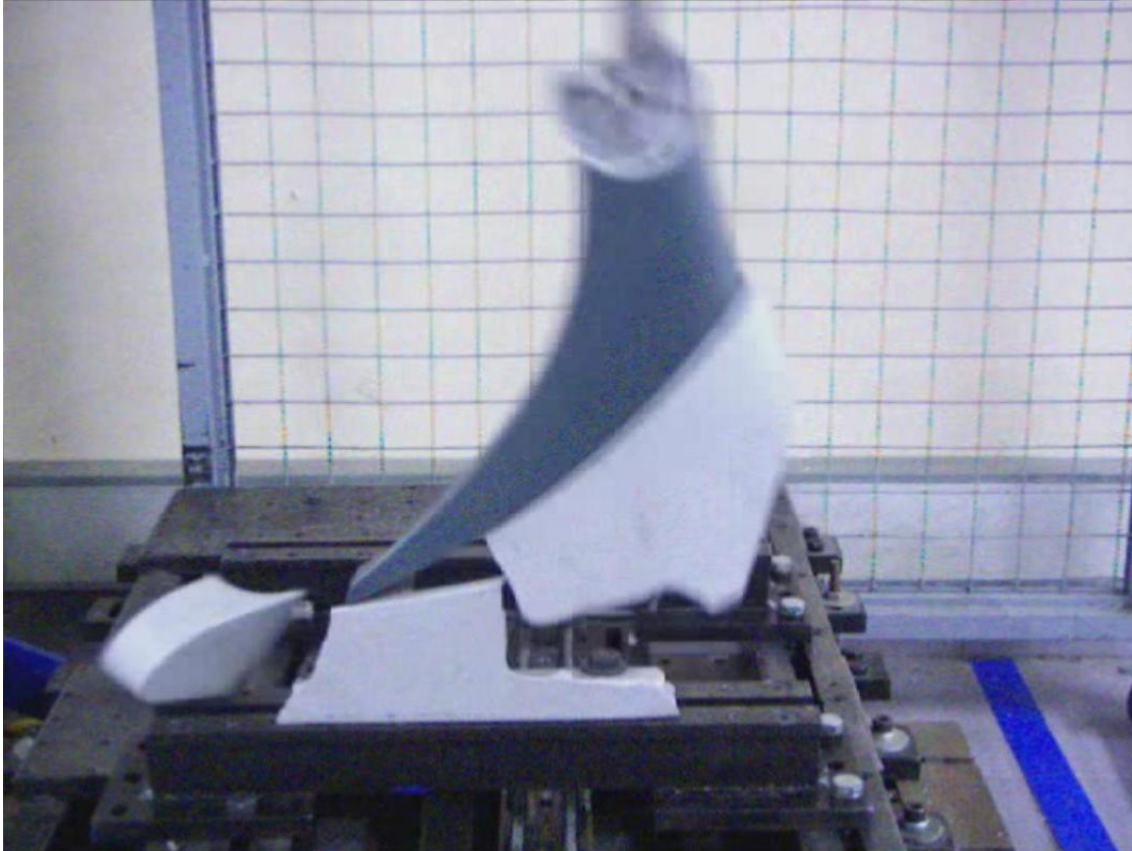


Fig. 39. Separación del componente de autocar por dos partes distintas.

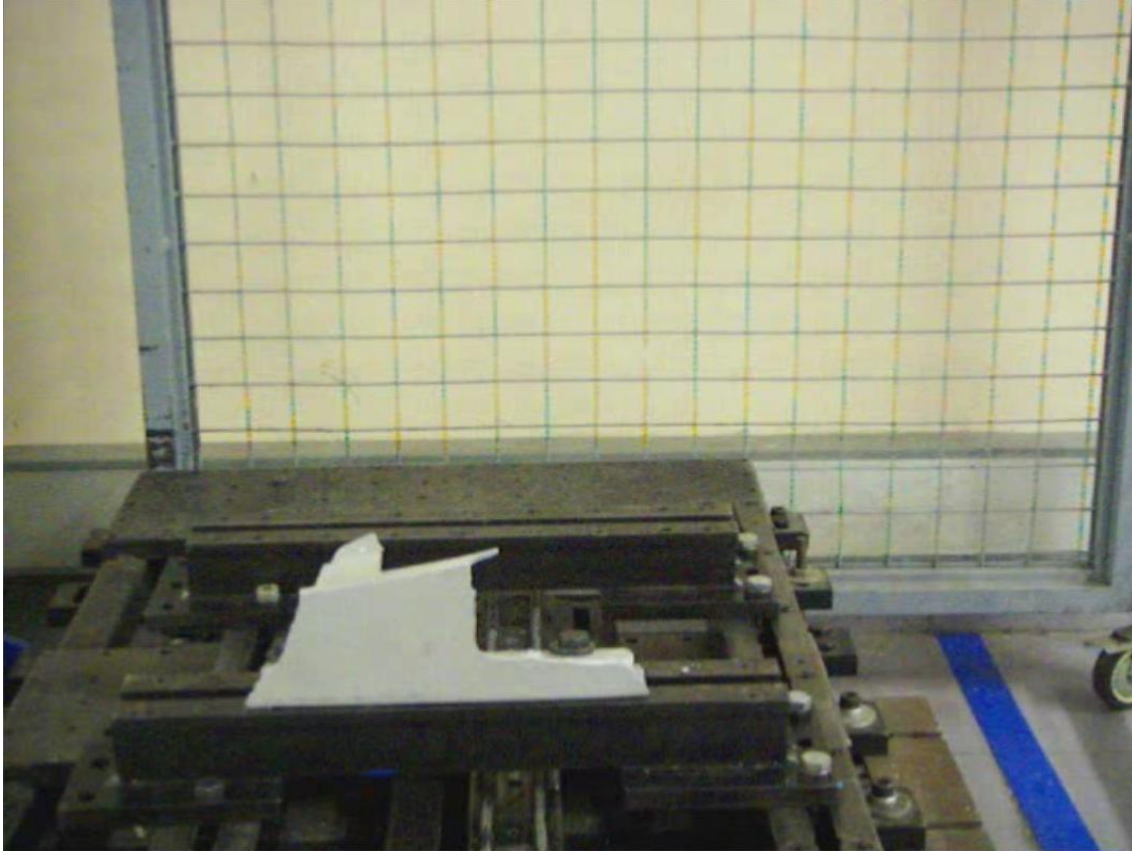


Fig. 40. A causa de la força aplicada en el ensayo y de la fractura del lateral de aluminio, dos trozos de la pieza salen despedidas, y solo queda la parte que estaba atornillada a la bancada rígida.

Dicho ensayo podría simular perfectamente lo que sucedería si se subiera una persona en el brazo que se une con el lateral, y por tanto, que peso podría aguantar este conjunto. En el ensayo realizado a este componente, el resultado es que la pieza se fractura con una carga de 341 kg, que es un valor entre 3 y 4 veces superior al peso medio aproximado de una persona. Pero y si en lugar de subirse una persona al conjunto brazo-lateral, esta se sube y se pone a saltar, o directamente intenta romper el lateral de alguna forma; en este caso, el resultado de los 341 kg ya no es tan tranquilizador, ya que a lo mejor no puede aguantar alguno de esos esfuerzos.

El análisis exhaustivo de la curva de esfuerzo-tiempo mostrada en la Fig. 41, y que corresponde a este ensayo, ha rebelado información relevante que se mostrará a continuación.

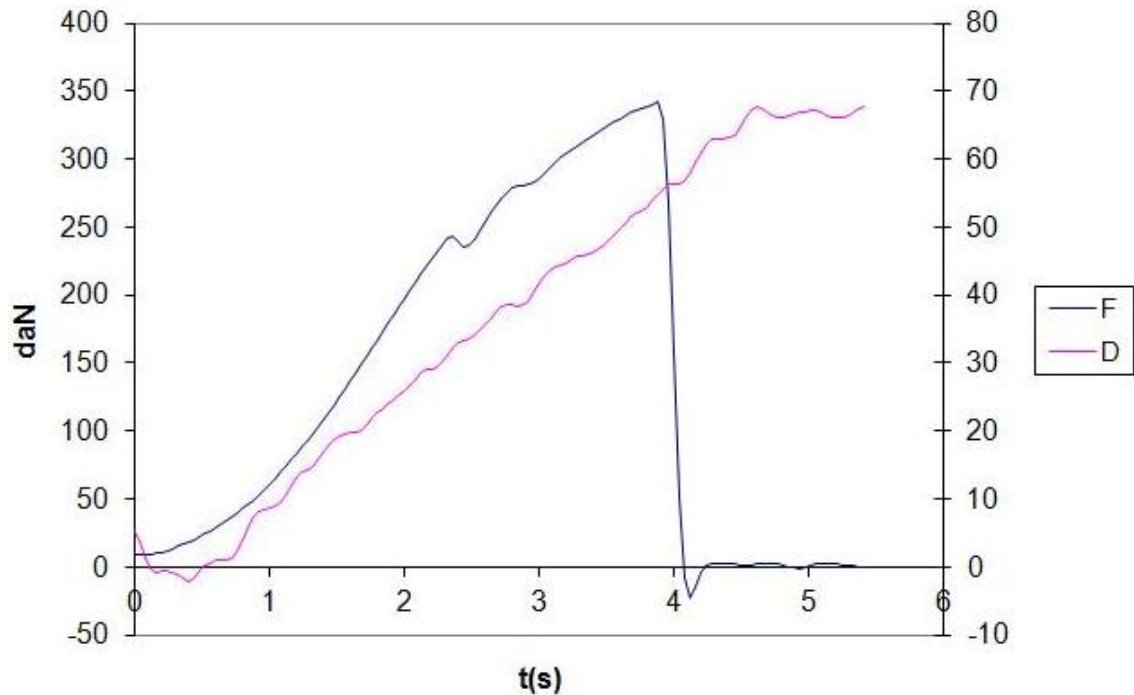


Fig. 41. Curva esfuerzo-tiempo.

Como se aprecia en la Fig. 41, el componente estudiado no tiene apenas deformación, ya que este tipo de ensayo mecánico le provoca una rotura frágil, y eso ocasiona una gráfica esfuerzo-tiempo muy sencilla y constante, ya que prácticamente se muestra invariable hasta el momento de la rotura. Después de producirse el ensayo, si se cogen los trozos resultantes de la pieza, se ve perfectamente que estos encajan perfectamente, y eso es debido al casi inexistente porcentaje de alargamiento ante rotura del lateral, que conlleva que este no se deforme y se fracture antes.

Como resultados numéricos, se especifica que este material se fractura a los 3,9 segundos con una carga de 341,9 daN. La distancia que se aprecia en la gráfica de la Fig. 41, no se tiene en cuenta en el análisis de este ensayo porque es una medida de la palanca que produce la carga y no de la pieza, y por lo tanto no aporta ningún tipo de información importante para el estudio del lateral.

7. Ventajas de la fabricación del lateral de aluminio estudiado por técnicas de inyección en estado semisólido

En este proyecto se ha estudiado anteriormente un lateral de automoción, el cual tiene unas determinadas propiedades y características; a favor:

- Precio de la aleación L-2630 por ser de segunda fusión.
- Precio del proceso de fabricación convencional por inyección a alta presión.

En contra:

- Propiedades mecánicas inferiores respecto a otras aleaciones de Al-Si por estar hecha a partir de chatarra.
- El método de fundición utilizado es el causante de que exista mucha porosidad gaseosa.
- La fundición inyectada provoca que no se pueda aplicar un tratamiento térmico posterior a este componente, como el T6, que es el que propicia las mejores características mecánicas.

La aleación L-2630 cuenta con las siguientes propiedades mecánicas:

Tabla. 9. Características mecánicas de la aleación L-2630 moldeada por fundición a alta presión, [10].

Aleación	Proceso	Estado	Rp0,2% MPa	Rm MPa	A %
L-2630	HPDC	Bruto de moldeo	140	240	<1

El concepto de mejora aplicado a un componente en el sector de la automoción es muy sencillo: mismas o mejores propiedades y características, a un precio igual o inferior. En el siguiente apartado se hace una descripción de las diferentes alternativas existentes y, a partir de esta información, se valorará si existe alguna opción viable para su implantación real en la industria actual automotriz.

La aleación L-2630 se suele fabricar por inyección a alta presión, dentro del moldeo convencional. Si se cambiase el proceso de fabricación original por una conformación en estado semisólido se podrían mejorar:

- Propiedades mecánicas.
- Posibilidad de aplicar tratamientos térmicos posteriores, lo que mejoraría aún más las características mecánicas del material.

De todas formas, si se optara por una aleación de aluminio primario (directamente obtenida de la Bauxita):

- Menor cantidad de impurezas debido a la mayor pureza de estas aleaciones.
- Incremento del coste.

Se han elegido dos aleaciones muy conocidas y utilizadas hoy en día; las elegidas han sido la A356 y A357, que cuentan con una gran variedad de posibilidades de conformación. Aparte de poder moldearse por métodos tradicionales, son las aleaciones más utilizadas para la conformación de componentes de automóvil en estado semisólido. Algunas de las aleaciones que se pueden utilizar en semisólido se muestran en la Tabla. 10. En la Fig. 33, pueden observarse algunos componentes conformados por diferentes técnicas de SSM.



Fig. 42. Ejemplo de piezas fabricadas por SSM, [11].

Tabla. 10. Aleaciones aptas para SSM, [11].

Aleaciones AlSi
356
357
319
380 (equivalente a la L-2630)
333
Aleaciones AlCu 2xx
Aleaciones AlMg 5xx

Estas dos aleaciones citadas tienen un relativo alto contenido de fase eutéctica, y ofrecen buenas propiedades mecánicas cuando son tratadas térmicamente. La A356 y A357 tienen unos valores muy parecidos. En lo referente al límite elástico, a la resistencia a la tracción y a la dureza, la A357 es algo superior; en cambio la A356 cuenta con un mejor porcentaje de

alargamiento a fractura. La diferencia entre estos dos materiales radica en sus composiciones químicas, concretamente en un solo elemento, el magnesio, lo que provoca esas diferencias en las características mecánicas y también en los costes (Tabla. 11).

Tabla. 11. Comparativa de precios entre distintas aleaciones.

Precio L-2630	<	Precio A356	≤	Precio A357
---------------	---	-------------	---	-------------

Analizando estas tres aleaciones se llegan a las afirmaciones:

- A la L-2630 no se le puede aplicar un tratamiento térmico T6, en cambio a las otras dos sí. Los tratamientos térmicos posteriores al moldeo aumentan las propiedades mecánicas de las aleaciones a las que se les aplican y, el T6 es el que mejor resultados confiere. Normalmente, aplicar un tratamiento térmico como el T6, puede hacer descender ligeramente el porcentaje de alargamiento de la pieza o probeta (según el tipo de tratamiento térmico, la aleación, los parámetros ambientales,...).
- La aleación A356 y A357 suelen tener unas características mecánicas algo superiores a las de la L-2630, pero es en el límite elástico y sobretodo en el porcentaje de alargamiento ante rotura, donde se dan las diferencias de valores más significativas.

La opción elegida, podría ser la A356, o bien la A357, pero en este estudio comparativo se ha preferido optar por la A356 por los siguientes motivos:

- Tiene unas características mecánicas superiores a las de la aleación L-2630 y bastante parecidas a las de la A357. El tener los mejores resultados en el porcentaje de alargamiento ante fractura hace que sea muy interesante respecto a la L-2630, la cual tiene un porcentaje de alargamiento casi inexistente, y es uno de los motivos por los que no se deforma y se rompe frágilmente.
- Respecto a la L-2630 tiene un precio superior, pero más barato que en referencia a la A357. Es la segunda aleación más barata, cosa que ayudará cuando se explique si es viable económicamente utilizando diferentes procedimientos para su fabricación.

Con la aleación de aluminio A356 se consiguen mejores resultados que la L-2630 (lo mismo para la A357), y estos corresponderían a los obtenidos por técnicas de SSM. A continuación, en la Tabla. 12 se muestran algunas propiedades mecánicas de la aleación de aluminio A356 mediante procesos convencionales de moldeo:

- Coquilla.
- Molde Permanente.
- Squeeze Casting.

Y la A356 con técnicas de conformación en estado semisólido se incluirían:

- Thixocasting.

- New Rheocasting.
- Sub Liquidus Casting.

Se han incluido propiedades mecánicas de la aleación L-2630 (EN AC-46500) en moldeo convencional (fundición inyectada HPDC) y estado semisólido (Semi Solid Rheocasting), ya que es la aleación utilizada en el componente objeto de estudio. Por otro lado, como la L-2630 sólo puede fabricarse convencionalmente por HPDC, pues se ha incluido una aleación muy parecida en propiedades y composición (EN-AC 46400) para poder tener una referencia más respecto al moldeo tradicional, en esta ocasión, moldeo por coquilla.

Además de las tres aleaciones anteriores, también se incluirá una aleación similar conformada mediante forja en lugar de moldeo, y la elegida es la 6082. Puesto que la fundición de aluminio, tiene cualidades de sobra para sustituir a la fundición férrea, se ha incluido por último una fundición férrea de matriz ferrítica dúctil, y comparable a las anteriores. La elegida ha sido: norma SAE J434c grado D4018.

En la Tabla. 12 sólo se muestran aleaciones con tratamiento térmico T6 (excepto la fundición ferrosa), que es el que mejores propiedades aporta normalmente y, además ayuda a prevenir la corrosión (Fig. 43). Los datos que se aportan en dicha tabla son aproximados, ya que se han utilizado en distintas piezas de diferentes geometrías, tamaños, espesores,... y por ello, son sólo orientativos. En las Tablas. 13 y 14, se muestra la composición química de estos materiales.

Tabla. 12. Propiedades mecánicas de algunos materiales por diferentes técnicas de conformación, [11-13].

Aleación	Proceso	Estado	Rp _{0,2%} MPa	Rm MPa	A %
A356	TC Thixocasting**	T6	227	302	16,9
	NRC New Rheocasting**		300	325	11,8
	SQC Squeeze Casting		200	275	12,0
	Molde permanente		205	280	10,0
	SLC Sub Liquidus Casting**		293	346	11,7
	Coquilla*		206	280	10,0
EN AC-46500	SSR Semi Solid Rheocasting		205	272	1,4
	HPDC Fundición inyectada		**		
EN AC-46400	Coquilla*		235	275	1,5
6082	Forja		310	340	11
D4018	Fundición férrea de matriz ferrítica dúctil	Bruto de colada	276	414	18

*NADCA, **resultados obtenidos por el CDAL, y ***la norma no contempla este tratamiento.



Fig. 43. Efecto de la corrosión en piezas conformadas por SLC, y con distintos tratamientos térmicos, [11].

Tabla. 13. Composiciones químicas de algunos materiales por diferentes técnicas de conformación, en porcentaje en masa, [10, 12].

Elementos	Aleaciones de aluminio				
	L-2630	EN AC-46400	A-356	A-357	6082
Si	8,0-11,0	8,3-9,7	6,5-7,5		0,70-1,30
Fe	1,3	0,8	0,19		0,50
Cu	2,0-4,0	0,8-1,3	0,05		0,10
Mn	0,55	0,15-0,55	0,10		0,40-1,00
Mg	0,05-0,55	0,25-0,65	0,25-0,45	0,45-0,70	0,60-1,20
Cr	0,15	—	—		0,25
Ni	0,55	0,20	—		—
Zn	3,0	0,8	0,07		0,20
Pb	0,35	0,10	—		—
Sn	0,15	0,10	—		—
Ti	0,25	0,20	0,25		0,10
Otros	0,25		0,10		0,10
Aluminio	Resto				

Tabla. 14. Composición química de la fundición férrica de matriz ferrítica dúctil SAE J434c D4018, en porcentaje en masa, [13].

Elementos	D4018
Si	1,8-3,0
Cu	0,15-1,0
Mn	0,10-1,0
Mg	0,03-0,06
Cr	0,03-0,07
Ni	0,05-0,20
C	3,20-4,10
Ce	0,005-0,20
Mo	0,010-0,10
P	0,015-0,10
S	0,005-0,035
Resto	Hierro

Se analizan los datos aportados por la Tabla. 12, y se procede a buscar la alternativa más interesante para sustituir al HPDC en el componente de automoción tratado. En esta tabla se han incluido:

- 10 ejemplos de aleaciones de aluminio concretas:
 - 5 en moldeo tradicional.
 - 1 en forja.
 - 4 en semisólido.
- Una fundición férrica de matriz ferrítica dúctil.

Aunque existen más opciones, pero se ha reducido la lista incluyendo materiales con un T6 (excepto la fundición férrica en bruto de colada) y que tuvieran, al menos, uno de los siguientes parámetros:

- Un aumento mínimo del límite elástico de un 100 % respecto a los 140 MPa de la aleación L-2630.
- Un crecimiento mínimo de la resistencia a la tracción en un 40 % tomando de referencia los 240 MPa de la L-2630.
- Puesto que el porcentaje de alargamiento a la rotura del componente estudiado es casi inexistente, el último parámetro es un porcentaje de alargamiento a la fractura superior al 10 %.

Si se comparasen los datos de la Tabla. 12. con los mismos materiales, pero con distintos tratamientos térmicos (bruto de colada y T5), se vería que las mejores propiedades mecánicas se consiguen con el T6 y las peores en estado bruto de colada (aquí no se tiene en cuenta a la fundición férrea, que está en bruto de colada).

Con los datos obtenidos en la Tabla. 12 se llega a las siguientes afirmaciones:

- La aleación L-2630 mediante SSR mejoraría tanto el límite elástico, la resistencia a la tracción, como el porcentaje de alargamiento respecto al método original HPDC (sin tratamiento). Pero aún utilizando un método SSM, sólo se llegaría a un valor cercano al 1 % en alargamiento, y los demás valores se podrían mejorar más, si se utilizaran otros procedimientos.
- El moldeo por coquilla en la EN AC-46400 daría unos resultados muy parecidos a la L-2630 por SSR.
- Mediante moldeos convencionales y utilizando la aleación de aluminio A356, se consiguen unos valores muy cercanos a los anteriormente expuestos, pero con mejores porcentajes de alargamiento a rotura.
- Con el Thixocasting se conseguirían unas propiedades mecánicas muy buenas, equilibradas y aceptables.
- Mejores características mecánicas que las anteriores serían las obtenidas mediante New Rheocasting, Sub Liquidus Casting y Forja. Normalmente, los procesos SSM con una misma aleación y tratamiento térmico suelen dar resultados cercanos, por eso que el TC de un límite elástico bastante inferior, puede ser debido a la pieza de TC en la que se obtuvieron esos valores. Aunque, sólo con el SLC y la forja se consiguen obtener todos los parámetros deseados:
 - Un aumento mínimo del límite elástico de un 100 % respecto a la L-2630 por HPDC en estado bruto de colada.
 - Un crecimiento mínimo de la resistencia a la tracción en un 40 % tomando de referencia el material del componente estudiado.
 - Un porcentaje de alargamiento superior al 10 %.
- Sin duda, las mejores propiedades mecánicas se darían con la fundición férrica, y sin tratamiento térmico.

De las diferentes técnicas de fabricación mostradas en la Tabla. 12 serían alternativas factibles (por propiedades y características) para sustituir al HPDC y por ende a la L-2630 en bruto de moldeo; las siguientes:

- Procesos SSM con aleaciones de aluminio A356 o A357 con T6.
- Forja con la aleación 6082 con T6.
- Fundición férrica con matriz ferrítica en bruto de colada.

A nivel de calidad-precio, en la siguiente imagen (Fig. 44) se muestran las alternativas más interesantes para sustituir a la fundición a presión, utilizada en la pieza estudiada. Los datos que se aportan en dicha imagen son aproximados.

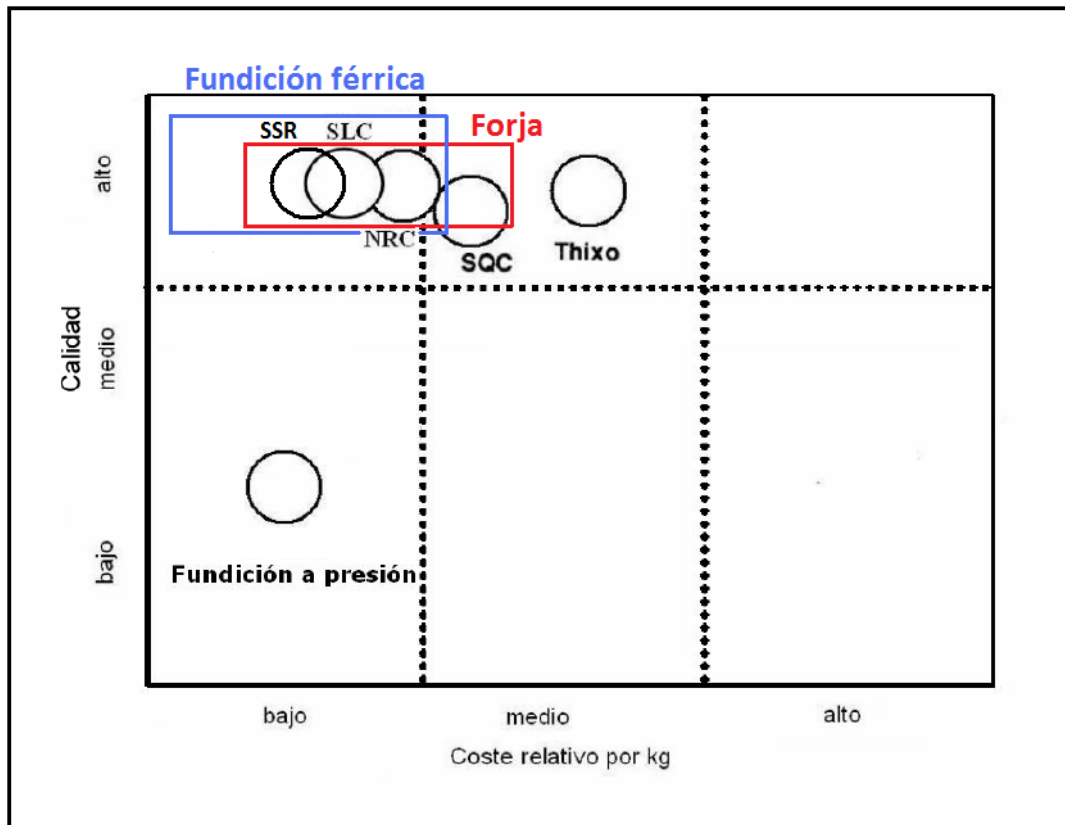


Fig. 44. Relación calidad-precio en diferentes procesos, [11, 14].

A partir de la Fig. 44 se llega a las siguientes decisiones:

- Se descarta el Thixocasting por su precio elevado.
- El Squeeze Casting también se menosprecia, por tener una calidad algo inferior que otras alternativas, y también un precio más alto.
- La fundición férrea tiene una calidad excelente, debido al grafito esferoidal que proporciona la dureza y resistencia al desgaste, y el hierro la ductilidad. Los precios pueden oscilar entre grandes rangos de valores, dependiendo de la forma de la pieza:
 - Geometría
 - Tamaño
 - Espesor
 - ...

Pero el argumento que hace que no se tenga en cuenta, es que las fundiciones férreas tienen un peso superior a los aceros, y muy alto respecto a las aleaciones de aluminio. En este proyecto interesan los componentes destinados al sector de la automoción, en el cual la actualidad es ir reduciendo el peso total de los diferentes vehículos en general, y usar este tipo de materiales iría en contra de esos objetivos.

- La forja sería un caso parecido a la fundición ferrosa. Muy buenas propiedades mecánicas, y una variedad de precios oscilantes, dependiendo del tipo de pieza utilizado. Pero, en este trabajo se tiene que descartar esta técnica, porque el lateral de

autocar objeto de estudio, dadas su geometría complicada, no se podría fabricar por forja.

- Finalmente, las alternativas a la fundición a presión, podrían ser el SSR, SLC y NRC. Estas tres opciones conseguirían mejores calidades, y precios algo superiores.

A continuación, mediante la Tabla. 15, se valoran definitivamente todos los elementos que influyen en el coste de una pieza, para algunos ejemplos de procesos utilizados. En dicha tabla se encuentran el SSR, SLC y NRC, que son las opciones más interesantes para sustituir a la fundición inyectada en la fabricación del componente de automoción estudiado.

Tabla. 15. Estudio de costes de varios procesos, [11, 14].

Coste comparativo de procesos de fundición							
Coste de varios elementos* y coste relativo final							
	Thixocasting	Inyección	Squeeze Casting	Molde permanente	Sub Liquidus Casting	New Rheocasting	Semi Solid Rheocasting
Material	2,5	1	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25
Herramientas	1	2	3	1,5	1	1	1
Capital	1,7	1,5	1,7	1,5	1,7	1,8	1,6
Proceso	1,2	1,1	1,3	1	1,1	1,3	1,2
Tratamientos térmicos	1	NO	2	2	1	1	1
Mecanizado	1	1	1,2	2	1	1	1
Acabado	1	1,5	1	2	1	1	1
COSTE FINAL	1,9	1	2,2	2	1,3	1,5	1,1

**1 el de más bajo coste alternativo, valores relativos en comparación a él.*

En la Tabla. 15 puede apreciarse el abaratamiento de costes totales que representan los procesos de conformación en estado semisólido: Sub Liquidus Casting (SLC®-THT), New Rheocasting (NRC) y Semi Solid Rheocasting (SSR). Aún así la técnica más económica seguiría siendo la inyección a presión.

Tanto en la Fig. 44 como en la Tabla. 15 se muestran datos orientativos y aproximados, por eso no se puede asegurar nada al 100 %, pero partiendo de estas aproximaciones teóricas se puede afirmar que el HPDC solo se sigue utilizando por su reducido coste. Es innegable la mejora de propiedades y características que ofrece la conformación en estado semisólido, de por ejemplo componentes para automoción. Sin duda, el presente y futuro pasan por conseguir abaratar aun más estas técnicas o incluso, crear alguna variante más de proceso SSM que tenga las mismas buenas propiedades mecánicas de las actuales técnicas de conformación en estado semisólido, y que resulte más económica que la fundición a presión.

A continuación se ha considerado una forma para abaratar el SSR, SLC y NRC, que provocaría resultados muy satisfactorios en el sector de la automoción. Puesto que estas técnicas tienen mejores características mecánicas que el HPDC concretamente, si se fabricará el componente

objeto de estudio por estos procedimientos, se podría estudiar reducir sus secciones y con ello se reduciría la masa del lateral. Reducir la masa de la pieza implicaría menos materia, y por tanto menor precio. Si esto se aplicara en este componente solo, pues se reduciría el peso del vehículo un poco, pero si se sustituyeran más piezas de fundición inyectada por procesos SSM, la reducción total del peso del automóvil sería mucho mayor e importante. Una reducción del peso de un coche provocaría:

- Un menor consumo de combustible.
- Menores emisiones de gases contaminantes
- Mejor comportamiento del vehículo. Por ejemplo, con un peso menor el coche frenaría antes. Al tener el coche unas aptitudes dinámicas mejoradas se podrían utilizar:
 - Motores más pequeños y eficientes.
 - Frenos más reducidos.
 - ...

Algo como sustituir piezas en HPDC por componentes en SSM podría desencadenar una serie de cambios que se traducirían en mejoras para el automóvil y ganancias económicas para la empresa.

- Aunque seguramente todo esto ocasionaría más ventajas, no hay que olvidarse de una muy importante: Si la reducción de masa de los componentes en SSM es muy alta, puede tener un coste más bajo que piezas en fundición inyectada.

En este proyecto, sobre lo de reducir la sección y por tanto, la masa del lateral IRATI, se basa en datos teóricos y orientativos que pueden mostrar que resultados se podrían conseguir realmente mediante medios adecuados:

- Utilización de software de elementos finitos.
- Analizar sección por sección la estructura del componente individualmente para saber que reducción de sección, y por tanto de peso, se podría realizar en esa zona.
- ...

Para conocer el valor hipotético y aproximado de reducción de masa que se podría obtener con los procedimientos SSM, se parte del límite elástico del componente estudiado: 140 MPa, o lo que es lo mismo, 140 N/mm². Se supone:

Sección 1: $S1 = 1 \text{ mm}^2$
 Límite elástico 1: $Rp1 = 140 \text{ N/mm}^2$
 Longitud: $L1 = L2 = 300 \text{ mm}$

Y se ha cogido unos valores medios para los procesos SSM de:

Límite elástico 2: $Rp2 = 290 \text{ N/mm}^2$
 Resistencia a la tracción: $Rm = 340 \text{ N/mm}^2$
 Porcentaje de alargamiento a rotura: $A = 11 \%$

Y sabiendo que:

$$S2 = (Rp1/Rp2) * S1$$

Se obtiene:

$$\begin{aligned} \text{Sección 2: } S2 &= 0,48 \text{ mm}^2 \\ \text{Relación entre secciones: } S2/S1 &= 0,48 \end{aligned}$$

Por último conociendo:

$$\begin{aligned} \text{Densidad de aluminio: } \rho1 &= \rho2 = 2,7 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3 \\ \text{Masa 1: } M1 \\ \text{Masa 2: } M2 \\ \text{Volumen 1: } V1 \\ \text{Volumen 2: } V2 \\ V &= S * L \\ M &= V * \rho \\ \text{Porcentaje de reducción de masa 2: } RM2 &= ((M1 - M2) * 100) / M1 \end{aligned}$$

Se podría conocer el resultado aproximado de reducción de masa que comportaría, sustituir la aleación L-2630 por HPDC (bruto de moldeo) por una A356 (T6) por SSM:

$$RM2 = 52 \%$$

Es inviable que en el lateral IRATI, u otro componente para automoción, se pueda conseguir una reducción de la masa de ese calibre, ya que no será lo mismo en secciones más comprometidas:

- Tamaño
- Forma
- Esfuerzos aplicados
- ...

Por ello, se va a suponer un valor más adecuado, la mitad concretamente. Así que se supone una reducción del 25 % de la masa.

El valor obtenido no deja de ser un dato teórico e hipotético, pero a partir de unos datos aproximados a la realidad, se mostrará en dinero, que precio costaría la pieza por HPDC y SSM, de forma aproximada y como valor orientativo. Se supone:

- El lingote de aluminio A356 conformado por SSM depende del “LME Aluminium” (1541,79 euros/tonelada; 12-06-2012), entre otros parámetros como:

- Ofertas actuales de la empresa que fabricará el componente.
- Cotización actual del mercado.
- Geometría, tamaño y características de la pieza.
- Número de componentes a fabricar, es decir, si son series grandes o pequeñas de piezas.
- ...

Se considera un precio aproximado de 2500 euros/tonelada.

- El lingote de L-2630 fabricada por HPDC depende del “LME Aluminium Alloy” (1457,73 euros/tonelada; 12-06-2012), entre otros valores. Se supone un precio aproximado de 2300 euros/tonelada, [15].

Se supone un precio final del componente de autocar fabricado por HPDC de 3000 euros/tonelada, y que el precio del proceso SSM para conformar la misma pieza podría subir entre un 10-20 %. También se estima que por SSM, la misma pieza que por HPDC, pesa un 25 % menos, y que la pieza por HPDC pesa exactamente una tonelada:

- El peso de la pieza por SSM comparable a la de HPDC de 1 tonelada es de: 0,75 Tn.
- Para un precio final del componente de autocar fabricado por SSM, un 10 % más caro que por HPDC: 2475 euros las 0,75 toneladas.
- Para un precio final de la pieza de aluminio conformada en estado semisólido, un 20 % más cara que por HPDC: 2700 euros las 0,75 toneladas.

En el caso estudiado de un lateral de autocar, sustituir la aleación de aluminio L-2630 mediante HPDC en estado bruto de moldeo, por la A356 (o también la A357) por técnicas SSM y con tratamiento térmico T6, es viable económicamente, si reducimos el peso del componente tanto como podamos. Todos los resultados aportados son aproximados, y su carácter es meramente orientativo, pero demuestran la viabilidad, tanto económica como a nivel de propiedades y características, de la sustitución de componentes de automoción fundidos a presión por piezas con procedimientos SSM. Igualmente, las técnicas que interesan son SSR, SLC y NRC, seguidos de este orden de más barato a más caro.

8. Conclusiones

- I. El peso medio de los automóviles ha aumentado drásticamente en las últimas décadas, y el objetivo de cara al presente y futuro pasa por invertir esa tendencia negativa.
- II. Las fundiciones férricas están siendo substituidas progresivamente por las fundiciones de aluminio en el sector de la automoción, debido a su mayor ligereza y propiedades mecánicas parecidas. Por el contrario, los aceros bajos en carbono están siendo reemplazados por aceros de alta resistencia. El peso más reducido de los componentes fabricados por aleaciones de aluminio, provoca un ahorro de costes en la fabricación de las piezas. Componentes de aluminio más ligeros utilizados en los automóviles equivale a:
 - Un ahorro de combustible.
 - Una reducción en la emisión gases nocivos.
 - Un mejor comportamiento del coche que permite utilizar:
 - Motores más pequeños y eficientes.
 - Frenos más reducidos.
 - ...
 - Reducción de los costes de fabricación de los vehículos.
- III. Actualmente la implantación del aluminio en los vehículos ya está muy extendida, y estos incorporan piezas de aluminio generalmente en lugares no críticos a la hora de absorber energía de impacto, ya que las propiedades del aluminio no son las más apropiadas para ello; en cambio el acero es mucho más adecuado para esas situaciones. Sin embargo, existen vehículos con elementos estructurales completamente de aluminio, aunque no son vehículos particularmente económicos.
- IV. Para amortizar los precios superiores de los componentes fabricados por aleaciones de aluminio, se pueden diseñar piezas idénticas que se puedan utilizar en distintos coches, variando algunas dimensiones. También, se pueden conformar componentes de aluminio que en lugar de constar de diferentes partes (laminados, fundiciones, extrusiones,...), estén hechos como una única pieza.
- V. Se ha estudiado un lateral de autocar, fabricado con la aleación de Al-Si L-2630 por HPDC sin tratamiento térmico aplicado, y pese a tener defectos por la solidificación (rechupes), las impurezas (por ser de segunda fusión) y el proceso de conformación (porosidad), el componente cumple con las exigencias mecánicas para las que ha estado diseñado. El lateral IRATI tiene un casi inexistente porcentaje de alargamiento a la rotura, junto con un discreto límite elástico. Después de realizar un ensayo de rotura, se afirma que las causas que provocan que la pieza se rompa frágilmente, sin deformación posible, son sus propiedades mecánicas, no sus defectos normales en una aleación de este tipo, y proceso convencional de inyección a presión.
- VI. Se han estudiado alternativas a la aleación, tratamiento térmico y técnica de conformación del lateral de automoción. Los resultados ponen de manifiesto que las opciones que podrían ser viables, tanto por características mecánicas como por coste total serían los siguientes procesos de conformación en estado semisólido con aleaciones de Al-Si-Mg, en el siguiente orden:

- i. Semi Solid Rheocasting.
- ii. Sub Liquidus Casting.
- iii. New Rheocasting.

Para que dichas técnicas fueran viables económicamente habría que reducir al máximo el peso del lateral de autocar. Con ello se conseguiría un precio competitivo del componente fabricado por SSM, y bajar el peso del vehículo en el cual se montara con todo lo que eso conllevaría, y que sería más interesante si fueran varios los componentes aligerados.

- VII. Los procesos SSM están teniendo un considerable impacto industrial, especialmente en el diseño y producción de componentes para automoción. Estas técnicas más avanzadas tecnológicamente, podrían empezar a sustituir a las fundiciones convencionales de aluminio en el sector de la automoción, dada sus superiores propiedades y características, y la capacidad de poder ser más ligeras. Eso sí, siempre que sean viables económicamente.

9. Perspectivas

Una vez realizado el estudio, se podrían llevar a cabo las siguientes acciones:

- Mediante las herramientas adecuadas, y estudiando el componente tratado en este proyecto u otro componente de automoción:
 - Conocer con resultados fiables y no aproximados, la reducción de masa total de la pieza estudiada, si se cambiara a un proceso SSM.
 - Conocer con resultados más cercanos a los reales, los precios pertenecientes a un componente fabricado por fundición convencional, y la misma pieza conformada por técnicas de SSM.
 - Mediante ensayos en laboratorio, conseguir más resultados experimentales sobre la pieza por HPDC y SSM con sus respectivas aleaciones y tratamientos térmicos. Y que se contrasten con otros datos teóricos o de ensayos y documentos ajenos a la realización de este nuevo trabajo.
- Demostrar que porcentajes de alargamiento a fractura se podrían conseguir por cada una de las técnicas actuales de SSM, respecto a la aleación L-2630 por HPDC, y si en algún caso se pueden conseguir resultados importantes en comparación al casi inexistente $<1\%$ que tiene el componente objeto de estudio.
- Descubrimiento de nuevas formas para abaratar costes en las tecnologías SSM, o búsqueda de nuevas técnicas derivadas de la conformación en estado semisólido, y que sean más económicas que la fundición a presión tradicional.
- Actualmente, se está trabajando con aleaciones de forja en procesos de moldeo, y aleaciones de moldeo en procesos de forja. Realizar un proyecto basando en procedimientos SSM utilizando aleaciones de aluminio de forja.
- Ya que las fundiciones de aluminio se utilizan en los automóviles, pero en zonas que no sean críticas a la hora de absorber energía de impacto, se podría intentar conseguir aleaciones de aluminio que fueran parecidas a los aceros de alta resistencia para esas aplicaciones.

10. Presupuesto

Metallografía	Concepto	Tiempo (h)	Coste unitario (euros)	Coste (euros)
Preparación de muestras	Seccionado+embutición+desbaste+pulido	1	77,2	77
	Operario	1	45	45
		SubTOTAL1		122,2
	Amortización	10 %		12,22
		SubTOTAL2		134,42
		18 % IVA		24,2
		TOTAL		158,62

Microestructura	Concepto	Tiempo (h)	Coste unitario (euros)	Coste (euros)
Análisis imagen	Ensayo	1	30	30
	Operario	1	30	30
		SubTOTAL1		60
	Amortización	10 %		6,6
		SubTOTAL2		66
		18 % IVA		11,88
		TOTAL		77,88

Porosidad	Concepto	Tiempo (h)	Coste unitario (euros)	Coste (euros)
Análisis imagen	Ensayo	1	30	30
	Operario	1	30	30
		SubTOTAL1		60
	Amortización	10 %		6,6
		SubTOTAL2		66
		18 % IVA		11,88
		TOTAL		77,88

Fractura	Concepto	Tiempo (h)	Coste unitario (euros)	Coste (euros)
Carga soportada	Diseño	-	300	300
	Fabricación mecanismo	-	3000	3000
	Ensayo	-	200	200
	Operario	-	50	50
		SubTOTAL1		3550
	Amortización	10 %		355
		SubTOTAL2		3905
		18 % IVA		702,9
		TOTAL		4607,9

Redacción PFC	Concepto	Tiempo (h)	Coste unitario (euros)	Coste (euros)
	Ingeniero técnico industrial	350	20	7000
		SubTOTAL1		7000
		18 % IVA		1260
		TOTAL		8260

PRESUPUESTO GLOBAL DEFINITIVO				
Actividad	Concepto	Coste unitario (euros)	Nº de ensayos	Coste total (euros)
1	Metalografía	158,62	45	7137,9
2	Microestructura	77,82	20	1556,4
3	Porosidad	77,82	15	1167,3
4	Fractura	4607,9	1	4607,9
5	Redacción PFC	-	-	8260
Total acumulado final				22729,5

11. Impacto medioambiental

Debido al cambio climático, a la contaminación de los coches, fábricas,... a algunas actitudes incívicas de la gente, hay que parar con esta tendencia negativa y provocar el menor impacto posible al planeta. A veces, los gestos pequeños son los que producen ventajas más grandes, si los hicieran todas las personas.

En la realización de este proyecto se tuvieron en cuenta cosas como:

- Para la preparación de probetas solo se dejaba abierta el agua el tiempo necesario.
- Después de limpiar las probetas, estas se secaban con un calefactor eléctrico, que evitaba utilizar papeles que acabarían desechados.
- Se alargó la vida útil de los papeles de vidrio para el pulido, y de demás herramientas, como sierras manuales y tronzadoras, todo lo que se pudo. Estas últimas, solo se les sustituían la hoja o disco, cuando se rompían.
- El aire acondicionado y calefacción, estaban graduados siempre a la temperatura recomendada.
- Mientras era de día, se aprovecha al máximo la luz del sol para evitar utilizar los fluorescentes y similares.
- Se desconectaban de la corriente las máquinas que lo permitían por tema de su funcionamiento, como las pulidoras automáticas, que mostraban datos numéricos innecesarios en una pantalla, y eso comportaba un consumo de electricidad innecesario.
- No se tenía el microscopio óptico, equipos informáticos, o las pulidoras, en funcionamiento si no se necesitaban de verdad.
- En lugar de imprimir páginas para preparar el proyecto, o analizar resultados, se ha utilizado siempre un ordenador portátil para evitar gastar folios innecesarios. También, toda la información se guardaba en el mismo portátil o en lápices USB, eliminando la necesidad de grabar CD's, que tarde o temprano habría que reciclar.
- A la hora de entregar la propuesta o memoria de este proyecto, se ha hecho en papel reciclado y siempre ha dos caras.
- Se ha viajado en transporte público siempre que ha sido posible, para desplazarse a la EPSEVG y sus laboratorios, y a la búsqueda de información en universidades y bibliotecas.

12. Agradecimientos

Se da las gracias al director de este proyecto, el Dr. Antoni Forn Alonso, y al resto de integrantes del CDAL y profesores de la EPSEVG que han ayudado en la realización de este trabajo.

También se le agradece a la presidenta del tribunal, la Dr. M. Teresa Baile Puig, por su valiosísima paciencia y sentido del humor, a la hora de corregir este proyecto.

Como menciones especiales, y ajenas al CDAL y EPSEVG. Quiero dar las gracias al Sr. José Antonio Maroto Soto, miembro de la Fundación CIDAUT, por su ayuda desinteresada, pese a no tener el placer de conocerle. Y sobretodo, a un ex-miembro del CDAL, al Sr. Miquel Punset Fusté del departamento de Biomateriales de l'ETSEIB.

Por último, dar las gracias a toda la gente presente en mi vida durante estos años, a mi familia, amigos, compañeros de clase, y a mi pareja.

13. Índice de tablas y figuras

Tablas

Tabla. 1. Nomenclatura de las aleaciones de aluminio _____	18
Tabla. 2. Equivalencias de aleaciones de aluminio para moldeo, según país y norma _____	19
Tabla. 3. Designaciones antiguas de las aleaciones de aluminio para moldeo correspondientes a España (UNE) _____	20
Tabla. 4. Composición química de aleaciones de aluminio para moldeo, en porcentaje en masa _____	20
Tabla. 5. Puntuación de las propiedades y características de las aleaciones de aluminio moldeadas tradicionalmente _____	22
Tabla. 6. Indicaciones de la resina para elaborar probetas _____	31
Tabla. 7. Operaciones y/o etapas de desbaste _____	33
Tabla. 8. Operaciones y/o etapas de pulido _____	33
Tabla. 9. Características mecánicas de la aleación L-2630 moldeada por fundición a alta presión _____	55
Tabla. 10. Aleaciones aptas para SSM _____	56
Tabla. 11. Comparativa de precios entre distintas aleaciones _____	57
Tabla. 12. Propiedades mecánicas de algunos materiales por diferentes técnicas de conformación _____	58
Tabla. 13. Composiciones químicas de algunos materiales por diferentes técnicas de conformación, en porcentaje en masa _____	59
Tabla. 14. Composición química de la fundición férrea de matriz ferrítica dúctil SAE J434c D4018, en porcentaje en masa _____	60
Tabla. 15. Estudio de varios procesos _____	63

Figuras

Fig. 1. Composición media en peso de un automóvil _____	4
Fig. 2. Evolución del peso en los vehículos de turismo del segmento de los compactos _____	5
Fig. 3. Evolución del contenido de aluminio en los automóviles producidos en Europa _____	8
Fig. 4. Contenido de aluminio en algunos coches producidos en Europa en el año 2008 _____	8
Fig. 5. Materiales empleados en la carrocería y el chasis del Audi A6 _____	9
Fig. 6. Montajes del soporte de la suspensión en aluminio fundido y puente de los soportes de la suspensión en aluminio en el Audi A6 _____	10
Fig. 7. Esquema general del ciclo de vida de un vehículo _____	11
Fig. 8. Desmantelación de coches en el final de su vida útil y proceso de reciclaje del aluminio _____	12
Fig. 9. Componentes que ya se fabrican en aluminio para el sector de la automoción _____	13
Fig. 10. Componentes de la gama IRATI, de Asientos Esteban, S.L. _____	14
Fig. 11. Comparación del Pilar B del Audi A8 (1994-2003) con el del Audi A2 (1999-2005) _____	15
Fig. 12. Plataforma MQB del Grupo Volkswagen _____	16
Fig. 13. Diagrama de fase del Aluminio-Silicio _____	21

Fig. 14. Detalle lateral IRATI	24
Fig. 15. Lateral IRATI con los canales de colada y las mazarotas aun conectadas al componente	25
Fig. 16. Plano de seccionado del componente objeto de estudio y localización de las distintas muestras	26
Fig. 17. Plano de localización de muestras de la sección	27
Fig. 18. Plano de localización de muestras de la sección	28
Fig. 19. Tronzadora refrigerada Struers Labotom-3	29
Fig. 20. Prensa de montaje de probetas Struers LaboPress-3	30
Fig. 21. Resina "Multi-Fast Negra" para el montaje de las muestras	31
Fig. 22. Ejemplo de papeles utilizados para el desbaste	35
Fig. 23. Desecador de probetas	36
Fig. 24. Estación de análisis de imagen	37
Fig. 25. Ejemplo de la porosidad de las secciones P1, P2 y P3, con 25 aumentos	39
Fig. 26. Ejemplo de la porosidad de las secciones P4-P10, con 25 aumentos	40
Fig. 27. Ejemplo de la porosidad de las secciones P11, P12 y P13 con 25 aumentos	41
Fig. 28. Microestructura del componente estudiado, con 500 aumentos	42
Fig. 29. Microestructura del componente estudiado cuando se trata de una zona cercana a la superficie, con 500 aumentos	43
Fig. 30. Microconstituyentes localizados en las micrografías, con 500 aumentos	44
Fig. 31. Microconstituyentes localizados en las micrografías, con 500 aumentos	45
Fig. 32. Aplicación de cargas	46
Fig. 33. Simulación de palanca	47
Fig. 34. Detalle rotura	48
Fig. 35. Detalle rotura	48
Fig. 36. Comienzo del ensayo de rotura del componente objeto de estudio	49
Fig. 37. Aparición de la primera grieta en la pieza	50
Fig. 38. Rotura del lateral por donde se creó la primera grieta y por una nueva zona	51
Fig. 39. Separación del componente de autocar por dos partes distintas	52
Fig. 40. A causa de la fuerza aplicada en el ensayo y de la fractura del lateral de aluminio, dos trozos de la pieza salen despedidas, y solo queda la parte que estaba atornillada a la bancada rígida	53
Fig. 41. Curva esfuerzo-tiempo	54
Fig. 42. Ejemplo de piezas fabricadas por SSM	56
Fig. 43. Efecto de la corrosión en piezas conformadas por SLC, y con distintos tratamientos térmicos	59
Fig. 44. Relación calidad-precio en diferentes procesos	62

14. Bibliografía

- [1] Desarrollo de la metodología para la realización de análisis de ciclo de vida de automóviles y camiones. Centro Tecnológico de España Fedit, 18 de enero de 2011. Información obtenida directamente a través del Ministerio de Industria de España.
- [2] Actividades 2010: Observatorio Industrial del Sector Fabricantes de Automóviles y Camiones. Asociación Española de Fabricantes de Equipos y Componentes para Automoción (SERNAUTO). Información obtenida directamente a través del Ministerio de Industria de España.
- [3] Aluminium in cars. Asociación Europea del Aluminio (EAA), septiembre de 2008.
- [4] <http://www.audi.es/es/brand/es.html>
Página web oficial de Audi España. Consulta en abril de 2012.
- [5] <http://www.bmw.es/es/es/>
Página web oficial de Bmw España. Consulta en abril de 2012.
- [6] <http://www.mercedes-benz.es/>
Página web oficial de Mercedes-Benz España. Consulta en abril de 2012.
- [7] http://www.indesteban.com/idiomas_e.htm
Página web oficial de Asientos Esteban, S.L.
- [8] <http://www.volkswagen.es/es.html>
Página web oficial de Volkswagen España. Consulta en abril de 2012.
- [9] ASM HANDBOOK, Volume 2, Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special – Purpose Materials. Formerly Tenth Edition, Metals Handbook. Pág. 3-15, 62-123, 152-178.
- [10] Norma UNE-EN 1706:2011.
- [11] Recopilación de informes realizados y proporcionados por el CDAL.
- [12] <http://www.sanmetal.es/docs/1246450322.pdf>
Página web oficial de Sanmetal, S.A. Consulta en junio de 2012.
- [13] <http://www.matweb.com/>
Página web oficial de Material Property Data. Consulta en junio de 2012.
- [14] Baile Puig, María Teresa. Estudio de la conformación de componentes de Aluminio-Silicio en estado semisólido. Tesis Doctoral. (2005).

[15] <http://www.lme.com/>

Página web oficial LONDON METAL EXCHANGE. Consulta en junio de 2012.